

戦略的創造研究推進事業  
発展研究 (SORST)

研究終了報告書

研究課題  
「光を用いた量子情報システムの研究」

研究期間：平成 16 年 1 月 1 日～  
平成 21 年 3 月 31 日

山本 喜久  
(スタンフォード大学 教授)

## 1. 研究課題名

光を用いた量子情報システムの研究

## 2. 研究実施の概要

光と原子(人工原子)を用いた量子情報処理技術の確立をめざして、以下の研究テーマに取り組んだ。

### 1. 単一光子／エンタングル光子対光源

線形光学量子コンピュータ、非線形光学量子コンピュータ、量子鍵配達、量子中継などのシステムへ応用が期待される単一光子／エンタングル光子対を固体素子を用いて発生させることをめざした。

### 2. 量子コンピュータ／量子中継の研究

光パルスを用いて半導体スピinnの1ビット、2ビットの高速ゲートをインプリメントする技術を開発し、あわせてデコヒーレンス時間の改善をめざした。

### 3. エキシトン・ポラリトンのボーズ凝縮／量子シミュレーション

励起子ポラリトンのボーズアイソルレイン凝縮を実現し、その特性を解明する。原子の BEC で不可能な新しい物理を探索し、特に量子シミュレーションへの応用に結びつける。

### 4. 原子と光子を用いたエンタングルメントの制御

単一原子と超伝導キャビティを用いて、様々なエンタングルメントを形成し、その振舞いを実験的に明らかにする。

得られた主要な成果を以下にまとめる。

### 1. 単一光子／エンタングル光子対光源

- 1) 量子ドットに代わり、不均一拡がりの狭いドナー不純物にトラップされたエキシトンを発光源とする単一光子光源を開発した。具体的には、ZnSe/MgZnSe の量子井戸の中央にデルタドープされた  $^{19}\text{F}$  ドナー不純物をメサエッチ法でポスト形状に加工し、単一のドナー不純物だけ取り出し、その単一光子発生特性を調べた。その結果、2次の光子相関値  $g^{(2)}(0)=0.2$  という良好な結果が得られ、単一光子の発生が確認された。さらに、2つの単一光子光源から放出された2つの単一光子を 50%-50% ビームスプリッター上で衝突させ、量子干渉による Hong-Ou-Mandel dip を観測し、これから2つの独立した光源から識別できない単一光子が同時に発生されたことが確認できた。
- 2) 単一量子ドットを含むポスト形マイクロキャビティ、ディスク形マイクロキャビティの Q 値を高め、強結合状態を安定して実現できるようになった。同時に、デルタドープ層を量子ドットの近くに埋め込むことにより、単一量子ドットへ電子1つをドープし、人工的な3準位原子を形成する技術を確立した。

### 2. 量子コンピュータ／量子中継の研究

- 1) ゼーマン分裂した2つの電子スピinn状態とエキシトン状態で形成されるラムダ型3準位系を 100 フェムト秒から 1 ピコ秒程度の単一光パルスで励起し、電子スピ

ンの 1 量子ビット制御を実現した。実験では、まず GaAs バルク結晶中のドナー不純物集団に対して、この技術を確立した。次に、InAs 量子ドット中の単一の電子スピンに対して、この技術を応用して、高いフィデリティーで 1 ビット操作ができる事を確認した。

- 2) この系の基底状態はゼーマン分裂した束縛電子スピンの 2 状態であり、束縛エキシトン状態の最低エネルギー状態との間に、ラムダ型の 3 準位原子系を形成する。この系のラマン散乱過程を用いた電子スピンの光ポンピングによる初期化と  $T_1$  スピン緩和時間の評価(~4ms)に成功した。さらに、スピニエコー法を利用して  $T_2$  デコヒーレンス時間の評価を行い、~2μsec という長い  $T_2$  時間を達成した。

### 3. エキシトン・ポラリトンのボーズ凝縮/量子シミュレーション

- 1) キャビティ光子の共鳴エネルギーを量子井戸エキシトンに比べ、高エネルギー側へシフトすると、低エネルギー側のポラリトンの減衰時間は長くなり、同時にバンド内のエネルギー緩和時間は短くなっている。熱平衡状態へ到達しやすくなる。この原理を用いて、エキシトンポラリトンのボーズ凝縮を実現し、これに伴って発生するボゴリューボフ励起スペクトルを観測することに成功した。
- 2) エキシトンポラリトンのボーズ凝縮体が BKT 相を示している証拠となる量子渦対が形成されていることを実験的に明らかにし、Gross-Pitaevskii 方程式の数値シミュレーションでこれを再現することに成功した。

### 4. 原子と光子を用いたエンタングルメントの制御 (ENS グループ)

- 1) 単一リドベルグ原子と超伝導キャビティの強結合を利用して、エンタングルメントの人工的制御をめざした。第 1 のプロジェクトでは、光子寿命数百 ms の高 Q 超伝導キャビティを 2 個建設し、これを用いて单一光子の量子非破壊測定、ハイゼルベルグ限界の原子分光を実現した。また、2つのキャビティ間に光子のシュレジンガーの猫状態を生成し、そのデコヒーレンス特性を解明する実験が進行中である。第 2 のプロジェクトでは、レーザー光により生成された冷却リュードベリ原子からスタートし、双極子相互作用を利用して单一の原子を決められた時刻にキャビティへ注入する実験を行なっている。この技術の完成のため、まず、アトムチップと呼ばれる集積回路デバイスに冷却原子をトラップし、ボーズ凝縮させることに成功した。

### 3. 研究構想

次の4つの目標に関して、次表に示すような計画に従って研究を進めた。

項目	平成15年度 (3ヶ月)	平成16年度	平成17年度	平成18年度	平成19年度	平成20年度
単一光子/エンタングル光子対光源		素子の設計、作製、評価		量子情報システムへの応用		
量子コンピュータ/量子中継		システム基礎検討		素子の設計、作製	システムの基礎実験	
エキシトン・ポラリトンのボーズ凝縮/量子シミュレーション		横方向閉じ込め ポテンシャル		ボーズハバードモデルの実装	量子相転移の観測	
冷却原子を用いた量子情報システム	基礎検討		3量子ビットシステムの構築、評価		アトム・チップの実現	

各サブグループでの新展開から生まれた目標を以下にまとめる。

#### 1. 単一光子／エンタングル光子対光源 グループ

高Qポスト型、ディスク型マイクロキャビティの開発、単一量子ドット不純物にトラップされたエキシトン発光の光パルスによる制御

#### 2. 量子コンピュータ/量子中継 グループ

単一調子ドットにトラップされた電子スピンの光パルスによる制御、ポストセレクションによるエンタングルメントの形成

#### 3. エキシトン・ポラリトンのボーズ凝縮と量子シミュレーション グループ

熱的平衡状態にあるエキシトン・ポラリトンのボーズ凝縮の実現とボーズハバードモデルの実装

#### 4. 原子と光子を用いたエンタングルメントの制御グループ

超伝導キャビティと冷却原子の結合系を用いた少数ビットの量子情報処理システムの構成

## 4. 研究実施内容

### 4. 1 単一光子／エンタングル光子対光源（山本グループ）

#### (1) 実施の内容

すでに実現された単一量子ドットを埋め込んだ分布反射型共振器を用いた単一光子光源には、二つの欠点があった。(1)量子ドットの発光波長には大きな不均一拡がりがあるため、共振器波長との共鳴をとるのが難しく、また多数の素子を同一波長で並列的に動作させるのが極めて困難である。(2)従来のポスト型共振器はその形状の不完全さのために、Q値を上げるのが難しい。(3)さらに、量子ドットは通常結晶基底状態にあり、磁場をかけても基底状態が分裂せず、ラマン散乱を起こすことができない。これらの欠点を克服し、様々な量子情報処理機能を持たせるため、我々は以下の研究テーマに取り組んだ。

1. 量子ドットに代わり、不均一拡がりの狭いドナー不純物にトラップされたエキシトンを発光源とする。具体的には、ZnSe/CdZnSe のダブルヘテロ接合の中央にデルタドープされた  $^{19}\text{F}$  ドナー不純物をメサエッチ法で1つだけ取り出し、これをを利用して単一光子光源を実現する。
2. 単一量子ドットを含むポスト形マイクロキャビティ、ディスク形マイクロキャビティのQ値を高め、強結合状態を安定して実現できるようにする。同時に、デルタドープ層を量子ドットの近くに埋め込むことにより、これへ電子1つをドープし、人工的な3準位原子を形成する。

図1にGaAs中の $^{29}\text{Si}$ 、ZnSe中の $^{19}\text{F}$ 、Si中の $^{31}\text{P}$ などに代表されるドナー不純物の特性をまとめた。図1(a)に示したように、 $^{29}\text{Si}$ 、 $^{19}\text{F}$ 、 $^{31}\text{P}$ などのドナー不純物は、最も単純な核スピン-1/2を持つ同位体で、量子メモリに適している。これらのドナー不純物は、低温で電子1つをトラップして中性化するか、この不对電子のスピンは量子プロセッサーに適している。最後に、中性ドナー不純物は低温で電子-ホール対をトラップし、これを束縛励起子という。束縛励起子は光吸収を光放出を介して、電子スピンと光子のインターフェースを担うことが出来る。図1(b)には、束縛励起子の発光波長の直径磁場依存性が示されている。電子スピンとホールスピンの

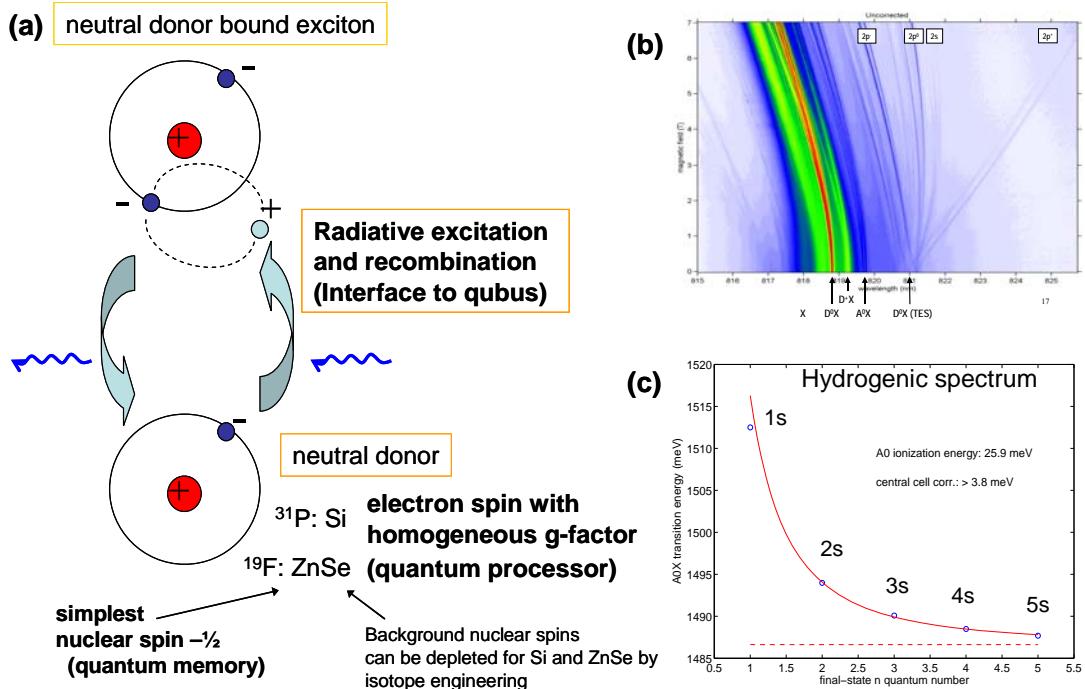


図 1

ゼーマン分裂に伴う発光波長の分裂とシフトが明らかに確認される。束縛励起子は1s軌道の中性ドナーへ遷移するだけではなく、2s、2p…などの軌道へも遷移し、これを Two Electron Satellite (TES) 発光という(図1(b))。直流磁場がゼロの時の1s、2s、3s、4s、5sへのTES発光波長が図1(c)に示されている。実線は水素原子モデルに基づくリーマン準位で実験結果とよく一致している。これらの実験結果から、半導体中のドナー不純物がクリーンな人工原子となっていることが示唆される。

図2にZnSe中の<sup>19</sup>Fドナー不純物を用いた単一光子光源の特性を示す(K. Sanaka et al., PRL投稿中)。図2(a)に示すように、MBE成長法を用いて、厚さ1nmのZnSe量子井戸層を作成し、その中央に<sup>19</sup>Fがδドープした。これを100nm程度のポスト形状に電子ビーム露光法を使って加工し、単一の<sup>19</sup>Fドナー不純物を分離した(図2(b))。これが単一光子光源となっていることは2次の相関関数 $g^{(2)}(0)$ が0.5以下となっていることから確認された。次に、2つの異なるポストデバイスから同時に単一光子を発生させ、これを50%-50%ビームスプリッター上で衝突させた(図2(c))。この時、ビームスプリッターの2つの出力端で光子が1つずつ検出される同時計数確率を2つの単一光子パルスの相対遅延時間の関数として測定したところ、図2(d)に示すようなHong-Ou-Mandel dipが観測された。これは、2つの単一光子が識別できない同一量子粒子となっていることを示したものである。

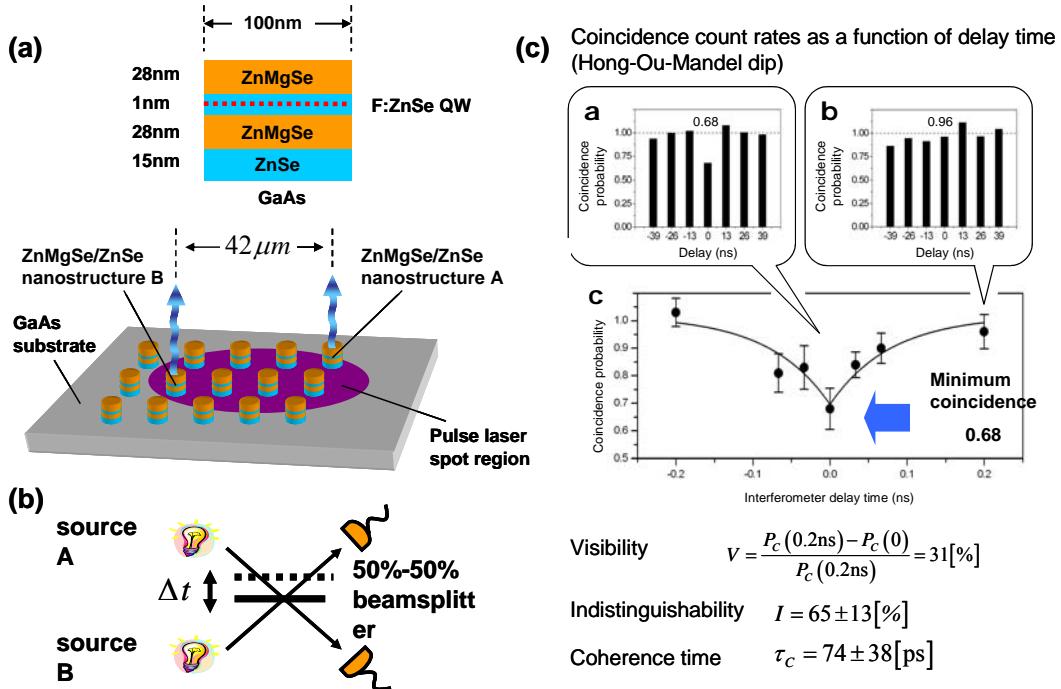


図2

図3に単一のInAs量子ドットを含む改良されたポスト型DBRマイクロキャビティの特性を示す。図3(a)はドライエッチ法で作製された直径1μmのポスト型マイクロキャビティのSEM写真を示している。共振器Q値は $2\times 10^4$ である。図3(b)は、温度を変化させた時の発光スペクトルを示していて、キャビティ光子(c)と量子ドット励起子(x)がアンチクロシングしていることから、この系が強結合状態にあることが分かる。

図3(c)には、2次の相関関数 $g^{(2)}(\tau)$ の測定結果が示されている。 $g^{(2)}(0)=0.19$ であり、単一光子がこの系から発生されていることが確認された。量子ドット励起子の寿命はキャビティのない場合620psであったが、キャビティ内にある場合、11.3psに短縮された。これから、パーセル因子 $F_p=\gamma/\gamma_0-1$ は61と非常に高い値となっていることが分かった。( $\gamma$ と $\gamma_0$ はキャビティ外での自然放出レート)。

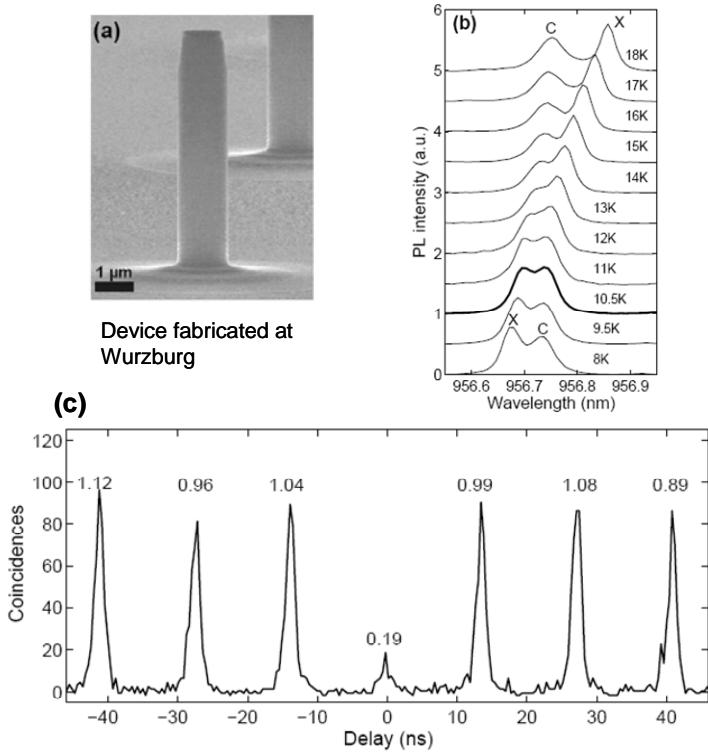


図 3

図 4(a)は、InAs 量子ドットを含む 2つのマイクロディスクキャビティがモノリシック導波路を介して結合している系の SEM 写真を示す[D. Press et al., PRL98, 117402, 2007]。このキャビティの共振器 Q 値も  $1\sim2\times10^4$  のオーダーであり、図 4(b)に示したようにキャビティー光子と量子ドット励起子の強結合に伴うアンチクロッシング特性を示す。さらに、この系では導波路への出力結合損失が共振器の内部損失よりも大きなオーバーカップリングの条件が満たされている。

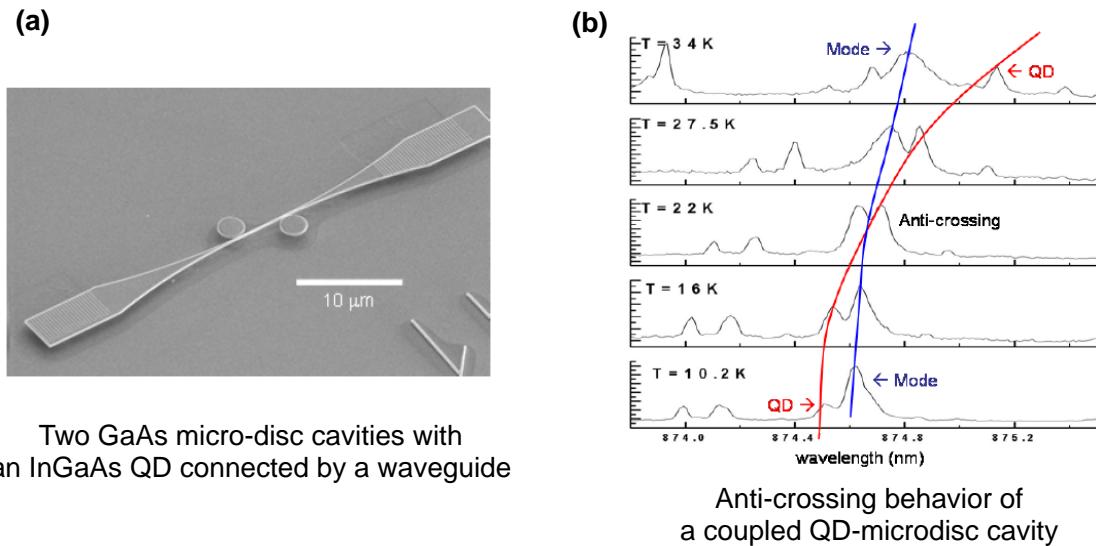


図 4

## (2) 得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

1. 中性原子やトラップイオンを用いた識別できない単一光子の発生については以前に報告があったが、2つの  $^{19}\text{F}:\text{ZnSe}$  ドナー不純物からの識別できない単一光子の発生は、固体素子としては初めてのものである。
2. ポスト型 DBR マイクロキャビティー、マイクロディスクキャビティー共に、共振器 Q 値を  $10^4$  以上に改良し、キャビティー光子と単一量子ドット励起子の強結合を達成した。アンチクロシング特性とアンチバンチングが同時に同一の系で実証されたのも、固体素子としてはこれが初めてのことである。量子中継や量子コンピュータへの応用を考えた場合、固体素子での成功は大きな意味を持つ。

## 4. 2 量子コンピュータ／量子中継（山本グループ）

### (1) 実施の内容

半導体中の束縛電子スピンを量子プロセッサ、束縛励起子を量子通信網(qubus)へのインターフェースと位置付ける量子中継、量子コンピュータの概念を提案し、以下の研究テーマに取り組んだ。

1. ゼーマン分裂した 2 つの電子スピン状態とエキシトン状態で形成されるラムダ型 3 準位系を 100 フェムト秒~1 ピコ秒程度の単一光パルスで励起し、1 量子ビットの制御を実現する。実験では、まず GaAs バルク結晶中のドナー不純物集団に対して評価した後、単一電子をドープした GaAs 量子ドット系へと拡張した。
2. この系の基底状態はゼーマン分裂した束縛電子スピンの 2 状態であり、束縛エキシトン状態の最低エネルギー状態との間に、ラムダ型の 3 準位原子系を形成する。この系のラマン散乱過程を用いた電子スピンの光ポンピング、光検出、スピニエコーなどの実験に取り組んだ。

図 5 に、単一極短光パルスを用いた半導体電子スピンの 1 ビット制御の原理を示す[S. Clark et al., PRL99, 040501 (2007)]。

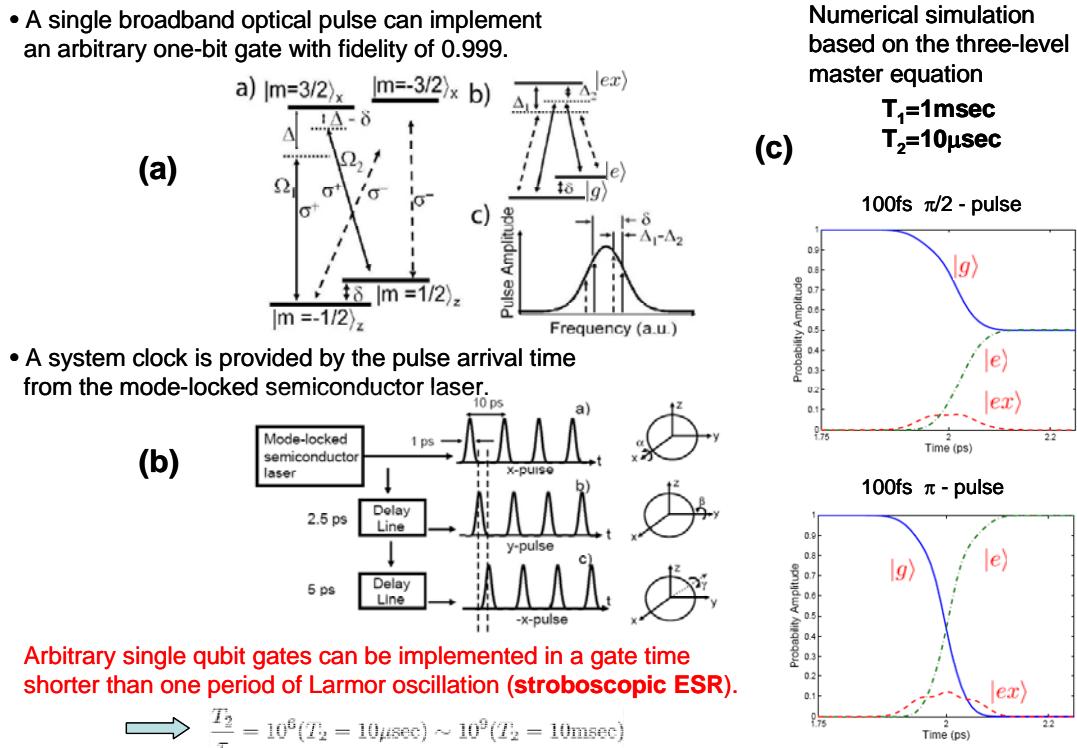


図 5

図 5 (a)は、量子ドット中の電子スピンや中性ドナー不純物の束縛電子スピンのゼーマンサブレベル  $|m=\pm 1/2\rangle_z$  と重い正孔スピンのゼーマンサブレベルでエネルギー準位が決められる束縛励起子のレベル  $|m=\pm 3/2\rangle_x$  を示している。直流磁場はボイド配置に印加されている。右回りもしくは左回り円偏光の極短光パルスの中心キャリア周波数が非共鳴の条件を満足し、しかも

光パルスの帯域がゼーマン分裂よりも十分に大きい場合には、電子スピンは2つのサイドバンド(上方および下方)を選択して誘導ラマン散乱を実行する(図5(a))。この時、上方、下方サイドバンドの位相差に対応して電子スピンの回転角が決まる(図5(b))。例えば、光パルスがt=0で入射した場合には、2つのサイドバンド間の位相差はゼロで、電子スピンはx軸の周りを回転する。一方、光パルスがラモア周期の1/4だけ遅れて入射した場合には、2つのサイドバンドの位相差は $\pi/2$ でy軸の周りの回転が誘起される。このようにして、単一光パルスを照射するタイミングを調整することにより、任意の軸の周りの回転が実現される。図5(c)には、100フェムト秒の光パルスで $\pi/2$ パルスと $\pi$ パルスを実現させた時の電子スピン状態の遷移の様子と励起子状態の仮想励起の様子が示されている。 $T_1=1\text{msec}$ 、 $T_2=10\mu\text{sec}$ というInAs量子ドットスピニのデコヒーレンス時間(以下に述べる)を仮定すると、 $\pi/2$ パルスと $\pi$ パルス共に99.9%のフィデリティーで実現できることが示される。

この光パルスを用いた電子スピン制御の実験は、まずGaAs中のドナー不純物に束縛された電子スピン集団に対して行われた[K. M. Fu et al., Nature Physics 4, 780 (2008)]。ついで、InAs量子ドット中の単一電子スピンに対して実証された[D. Press et al., Nature 456, 218 (2008)]。図6(a)に光ポンピングと光検出の原理が示されている。電子スピンの励起状態と最低エネルギーの励起子状態に共鳴した狭帯域のレーザー光を照射すると、電子スピンはその基底状態に初期化される。実験では、3nsec程度の光ポンピングにより $92\pm7\%$ のフィデリティーで初期化された。図6(b)には、~psの光パルスを照射した時のコヒーレント・ラビ振動の様子が示されている。パルス面積は0から $13\pi$ まで自由に変えることができる。2つの $\pi/2$ パルスを遅延間隔 $\tau$ を変化させて照射すると、いわゆるラムゼー干渉計が構成できる。図6(c)に観測されたラムゼー干渉縞を示す。この干渉縞のビジビリティーから、 $\pi/2$ パルス、 $\pi$ パルスのフィデリティーは94%、91%であったことが逆算された。

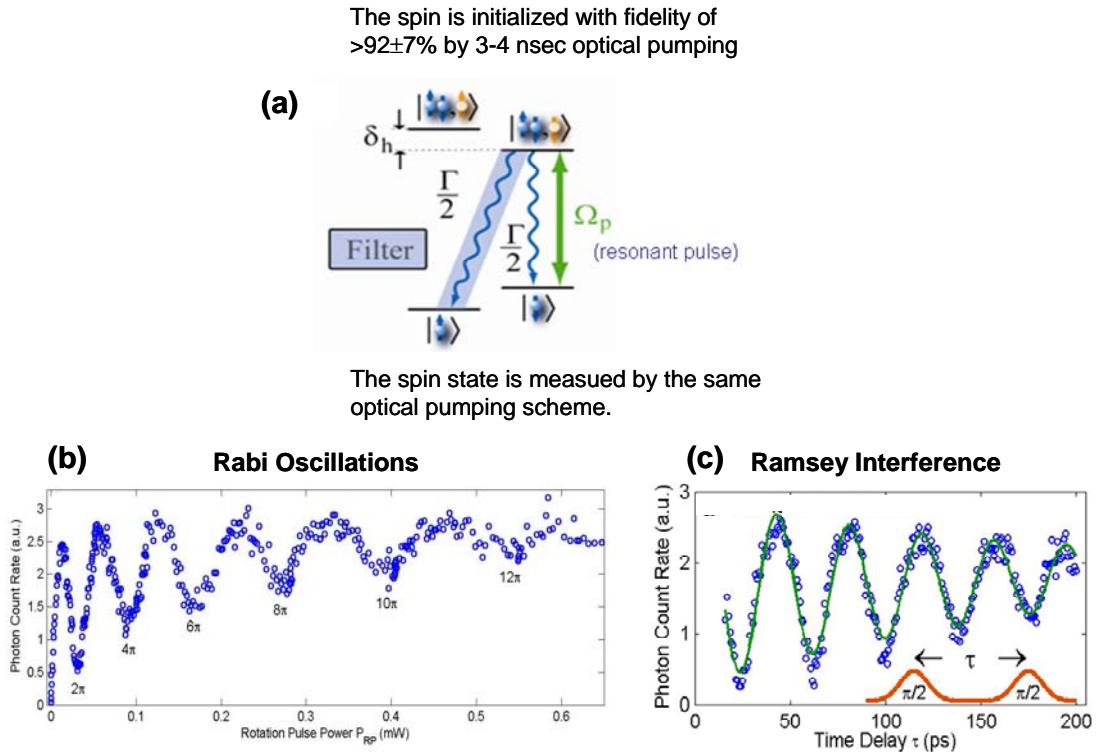


図6

図7には、半導体電子スピンの $T_1$ 時間、 $T_2$ 時間の測定結果が示されている[K. M. Fu et al., PRB

74, 121304 (2006)]。図 7(a)の実験では、光ポンピングにより電子スピンを基底状態に初期化した後、電子スピンが励起状態へ遷移した確率を光検出により測定した。測定例が図 7(a)の挿入図に示されている。このデータから  $T_1$  時間が推定でき、それを直流磁場  $B_0$  の関数としてプロットすると、理論的に予測されたとおり、 $B_0^{-4}$  依存症を持つことが確認できる。 $T_1$  時間は 4 msec 以上であった。一方、半導体電子スピンの  $T_2$  時間は 1~2 msec のオーダーである[K. M. Fu et al., PRL 95, 187405 (2005)]。この  $T_2$  時間は本質的な値ではなく、図 7(b)に示すような光パルスによるスピニエコーにより核磁場ゆらぎを抑圧することができ、 $T_2$  時間は本質的な値ではなく、図 7(b)に示すような光パルスによるスピニエコーにより核磁場ゆらぎを抑圧することができ、 $T_2$  時間は~数  $\mu$ sec に改善された[S. Clark et al., in preparation]。

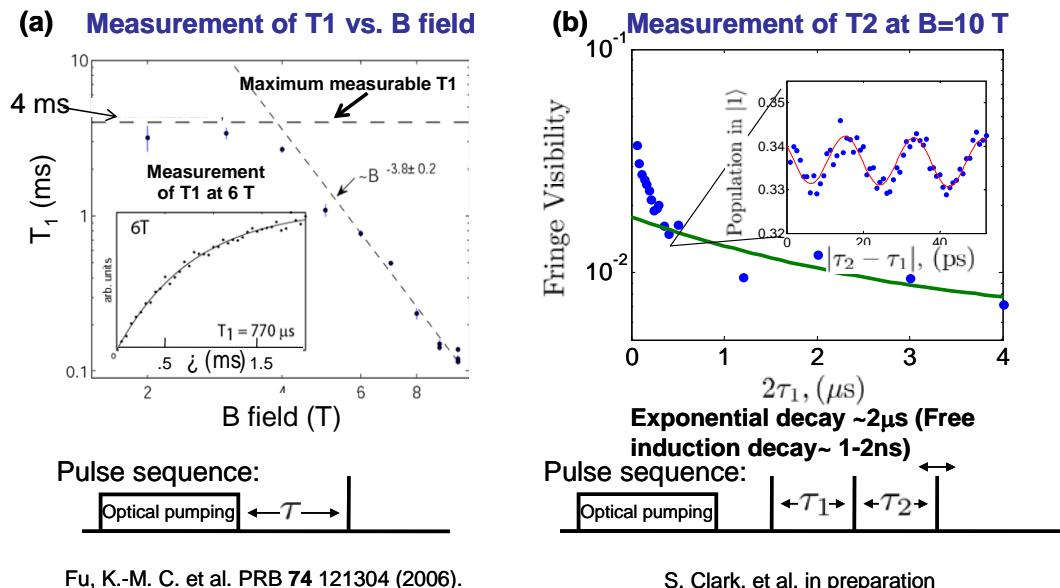


図 7

## (2) 得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

単一の極短光パルスを用いた電子スピンの制御技術は、量子情報処理への応用という視点から次の意味を持つ。

- 通常のマイクロ波を用いた ESR に比べ、電子スピンの回転を極めて短い時間で行える。特にラーモア周期よりも十分に短い時間内に電子スピンが回転できることから、将来は  $T_2$  時間のみでなく、 $T_1$  時間さえも延ばすことが可能になろう。
- 通常のマイクロ波を用いた ESR に比べ、小さな空間に制御光をフォーカスできる。これにより、2 次元空間に配置された電子スピン格子の中の単一の電子スピンのみに回転を与えることが可能となる。

#### 4.3 エキシトン・ポラリトンのボーズ凝縮/量子シミュレーション（山本グループ）

##### (1) 実施の内容

GaAs 多層量子井戸マイクロキャビティ中の励起子ポラリトンを用いて BEC を実現するには、2つの欠点があった。(1)エキシトン・ポラリトンは横方向へ自由に拡散していくため、複雑なダイナミクスを示す。(2)エキシトン・ポラリトンの発光寿命は、エネルギー緩和時間と同じオーダーであるため、熱的平衡状態に到達しにくい。これらの欠点を克服し、またボーズハーバードモデルなどの多体問題の量子シミュレーションの実験へ応用するため、以下の研究テーマに取り組んだ。

1. プレーナキャビティの上に金属膜を施すと、キャビティの共振周波数がブルーシフトする。そのため、下方ポラリトンのエネルギーもブルシフトする。従って、エキシトン・ポラリトンは金属膜のないところに閉じ込められるようになる。この原理を実証し、0次元閉じ込め、1次元、2次元の周期ポテンシャルを実現する。
2. キャビティ光子の共鳴エネルギーを量子井戸エキシトンに比べ、高エネルギー側へシフトすると、低エネルギー側のポラリトンの減衰時間は長くなり、バンド内のエネルギー緩和時間は短くなって、熱平衡状態へ到達しやすくなる。さらに、高い Q 値のマイクロ共振器を用いることによってポラリトンの寿命は一層長くなる。この方法を用いて、熱平衡状態での BEC を実験的に実現する。

図 8 に作製した励起子ポラリトンのトラップとその特性を示す[S. Utsunomiya et al., Nature Physics 4, 700 (2008)]。

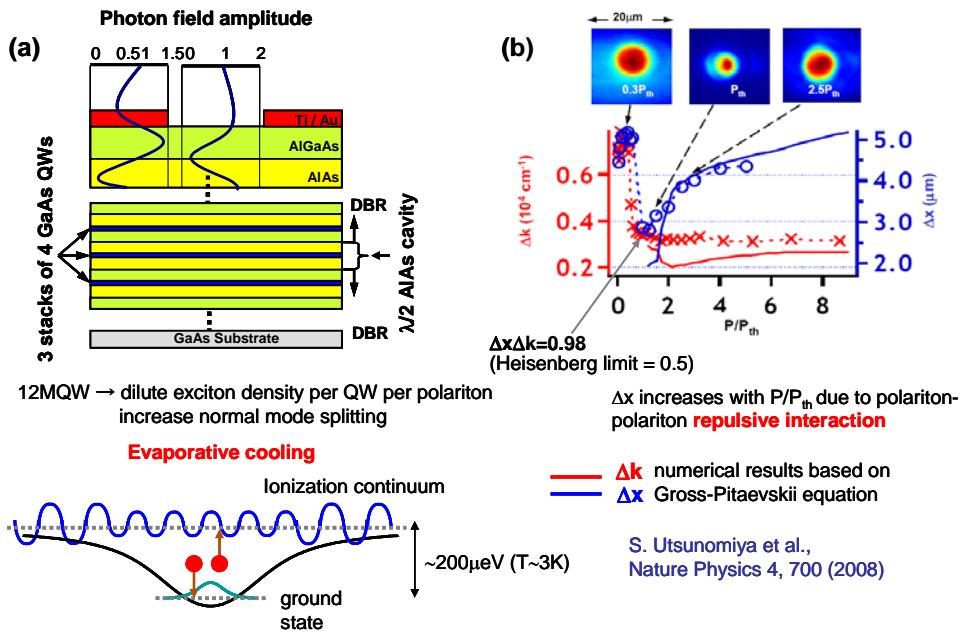


図 8

図 8(a)に示すように、プレーナキャビティ上の金属膜には円形の窓が開けられている。キャビティ光子の定在波の膜は金属膜のない時には AlGaAs と air の境界にあるが、金属膜がある時には AlGaAs 内部へシフトする。このため、キャビティ光子の共鳴周波数は金属膜の付いている外側の方が高くなる。下方ポラリトンの周波数(エネルギー)も、同様に金属膜の付いている外側で高くなり、ポラリトンのトラップが形成されることになる。測定されたトラップポテ

ンシャルは~200μeV(3K)程度で合った(図 8(b))。図 8(c)に、このポラリントトラップにおけるポラリトン BEC の空間コヒーレンスの特性が示されている。BEC しきい値をポンプレートが越すと、平面内波数の分数 $\Delta k$ 、空間広がり $\Delta x$  共に急激に減少する。その積 $\Delta x \cdot \Delta k$  は~0.98 であり、この値は最小不確定積に比べ約 2 倍大きな値になっているのみである。ポンプレートを更に増加させていくと、 $\Delta k$  はほぼ一定であるのに対し、 $\Delta x$  は増加していく。これはポラリトン間の反発する相互作用による BEC 凝縮体の拡張する様子を捉えている。実線は Gross-Pitaevskii 方程式の数値解であり、この物理をよく再現している。

図 9 に同じ原理を用いて作製された 1 次元格子ポラリントトラップとその特性を示す[C. W. Lai et al., Nature 450, 529 (2007)]。図 9(a)に作製した 1 次元周期構造を持つ金属膜と下方ポラリトンのエネルギーの測定結果を示す。図 9(b)は BEC しきい値以下、しきい値直上、しきい値の十分上のポンプレートのポラリトン空間分布を示している。しきい値以下、しきい値十分上のポンプレートでは、ポラリトンは金属膜のないポテンシャル最小点に集中しているのに対し、しきい値直上のポンプレートでは、ポラリトンは金属膜のあるポテンシャル最大点に集中している。図 9(c)には BEC しきい値以下としきい値以上のポンプレートでの、エネルギー対波数の分数関数の測定結果を示している。 $k=0$  での通常の BEC 凝縮体以外に、 $k \neq 0$  の BEC 凝縮体も存在していることが示されている。

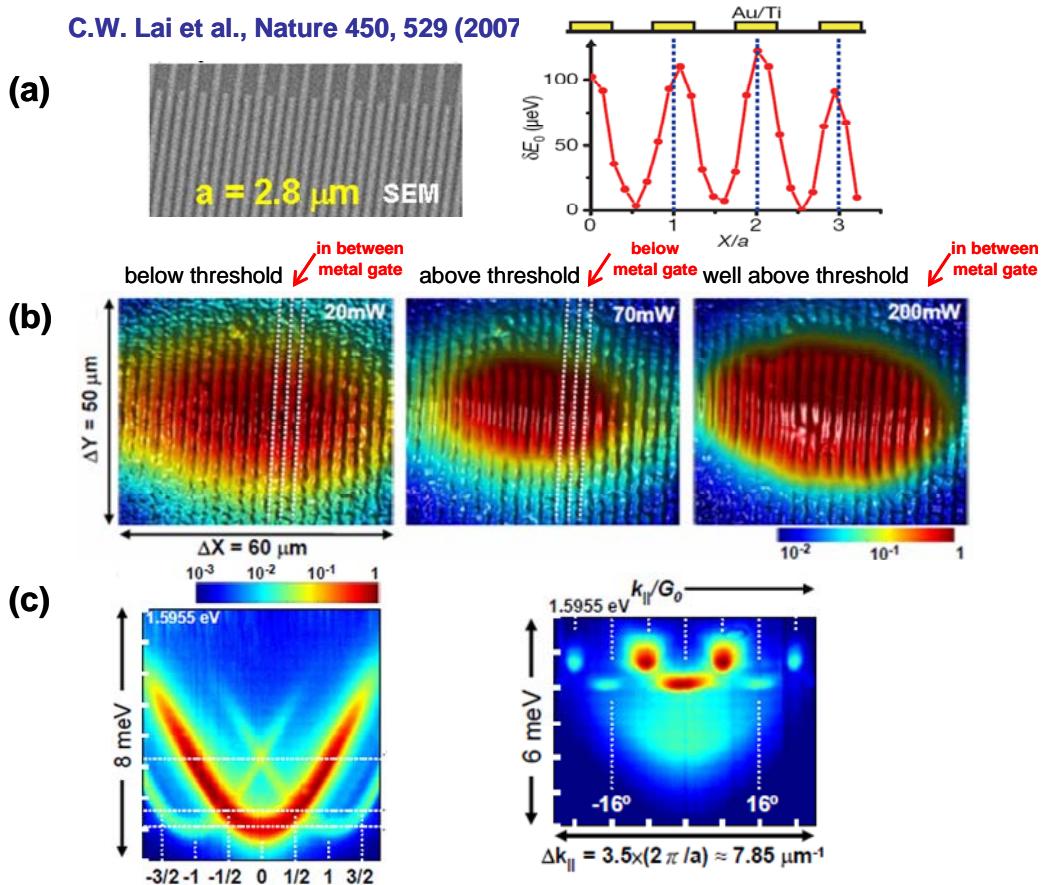


図 9

図 10 にこの実験結果の解釈が示されている。図 10(a) (b) に示すように、一次元周期構造により、エネルギー対波数の分散関係には、高次のブリルアンゾーンが形成され、準安定な A 状態 (P 波ブロッホ関数が  $\pi$  位相で結合した状態)、不安定な B 状態 (S 波ブロッホ関数が  $\pi$  位相で結合した状態)、安定な C 状態 (S 波ブロッホ関数が 0 位相で結合した状態) の 3 つが存在する。このうち、準安定状態 A と安定状態 C が図 10(c) (d) に示すようなモード競合を行って、先に述べたような実験結果(図 9)が得られたのである。

また、励起子ポラリトンが超流動状態となっていることの証拠として、ボゴリューボフ型励起スペクトルの観測[S. Utsunomiya et al., Nature Physics 4, 700 (2008)]と量子渦対の観測[G. Roumpos et al., APS March Meeting (2009)]に最近成功した。

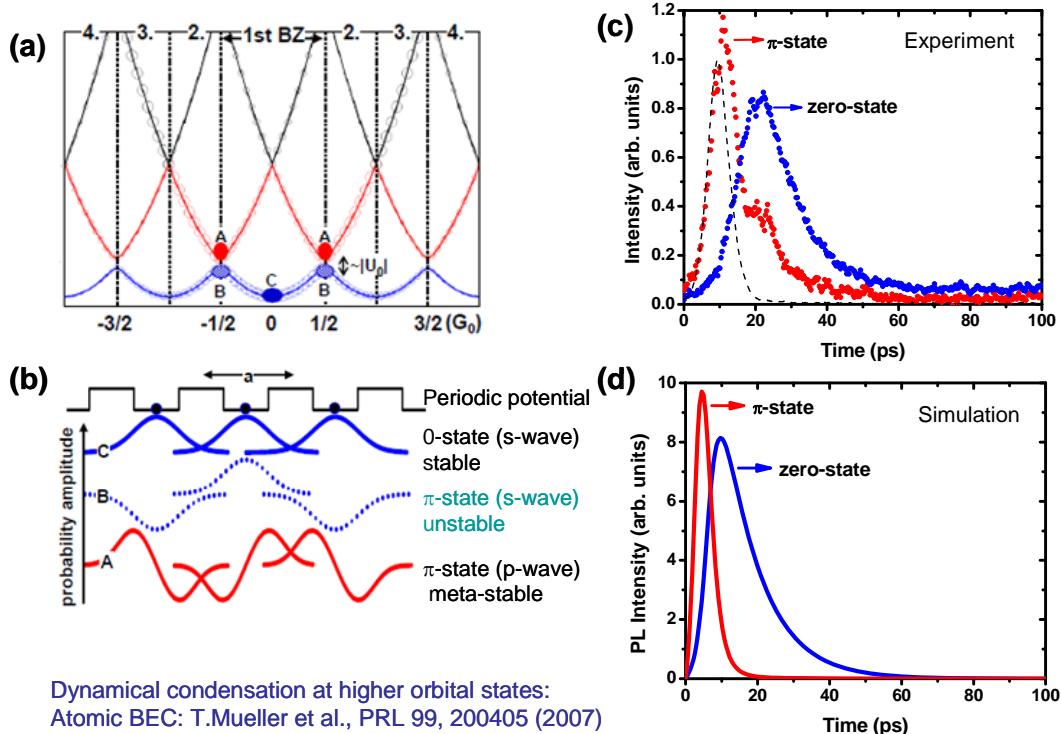


図 10

## (2) 得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

励起子ポラリトンの金属膜を用いたトラップを形成し、安定した BEC 凝縮体の実現に成功した。今後、この系を用いて、超流動モット絶縁体相転移や様々な P 波ホーダーの実験的検証を進めていく予定である。また、BEC に伴う誘導冷却現象を利用して NP 完全問題を解く量子コンピューターの可能性についても最近検討を開始した。今後は、この方面での研究も強化していく予定である。

#### 4. 4 原子と光子を用いたエンタングルメントの制御 (ENS グループ)

##### (1) 実施の内容

単一リドベルグ原子と超伝導キャビティの強結合を利用して、ミリ波光子とリドベルグ原子のエンタングルメントの人工的制御を確立した。昨年度までに、光子寿命 100ms 以上の高 Q 超伝導キャビティを建設し、これを用いて单一光子の量子非破壊測定に初めて成功した。また、光子のシュレジンガーの猫状態を形成し、そのデコヒーレンス特性を初めて解明した。第 2 のプロジェクトでは、アトムチップと呼ばれる集積回路デバイスでの冷却原子 BEC を実現した。

今年度は以下の 3 つのプロジェクトに取り組んだ。

##### A) 連続量子非破壊測定による量子ゼノ効果

共振器中の光子場がコヒーレント光源により励起される過程で、光子数の量子非破壊測定を行うと、光子場の位相が乱され、結果として、光子場の増強が抑圧される。この効果は量子ゼノ効果の一つとして知られていたが、今回初めて実験による実証に成功した。[J. Bernn et al., PRL 101, 180402, 2008]。図 11 にこの様子を示す。量子破壊測定をしない場合、共振器内光子数は単調に増加するが、量子非破壊測定を連続して行うと、光子数の増加が抑圧される。

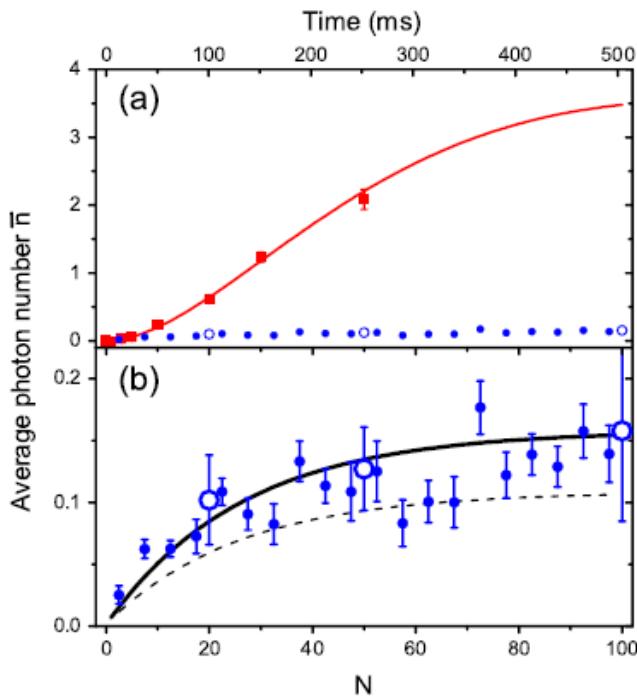


図 11

##### B) 光子数状態の寿命の測定

共振器中の光子数状態が損失により減衰していく様子を光子数の量子非破壊測定を用いて調べ、図 12 に示すように、減衰率が光子数  $n$  に比例して大きくなることを確認した [M. Brune et al., PRL 101, 240402, 2008]。

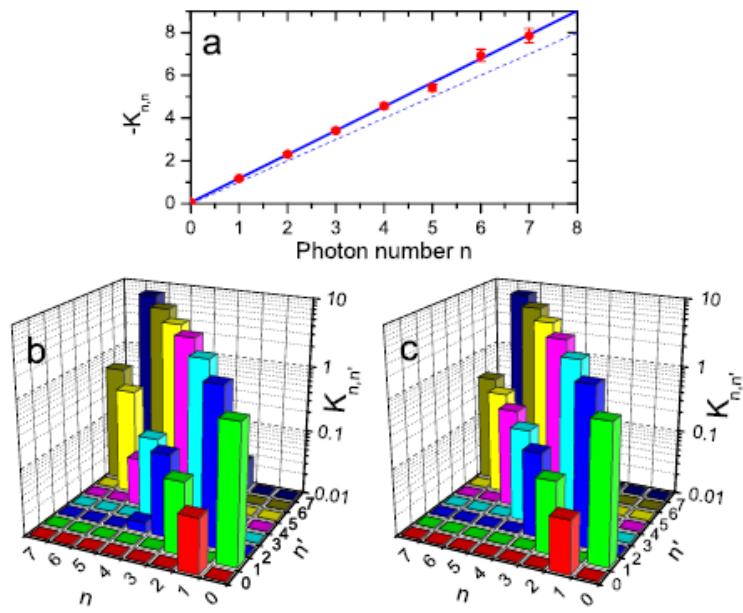


図 12

### C) シュレジンガーの猫状態のデコヒーレンス過程の観測

光子数の量子非破壊測定に光ホモダイン検波を組み合わせて、光子場の密度行列(Wigner 関数)を再現する方法を確立した。この技術をシュレジンガーの猫状態( $|\alpha\rangle+|-\alpha\rangle$ )に応用し、図 13 に示すように、非古典性の象徴である Wigner 関数の負の値がデコヒーレンス(光子損失)により消失する様子を初めて観測した[S. Deleglise et al., Nature 455, 510, 2008]。

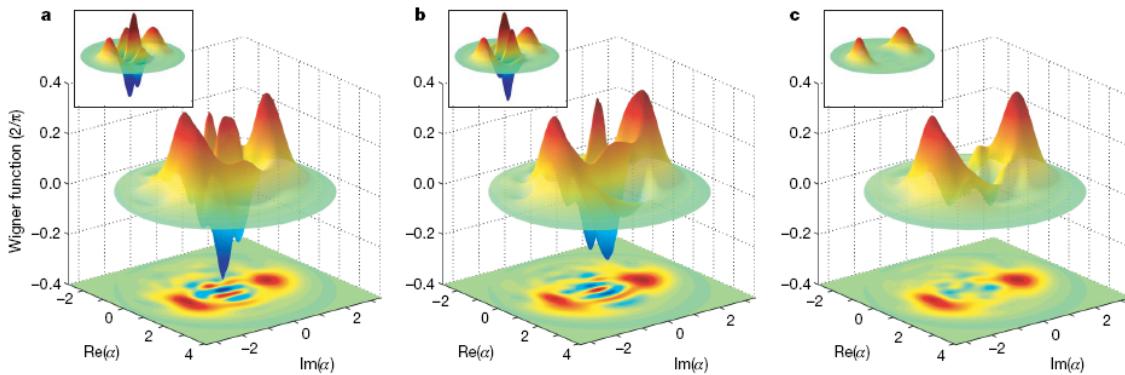


図 13

### (2) 得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

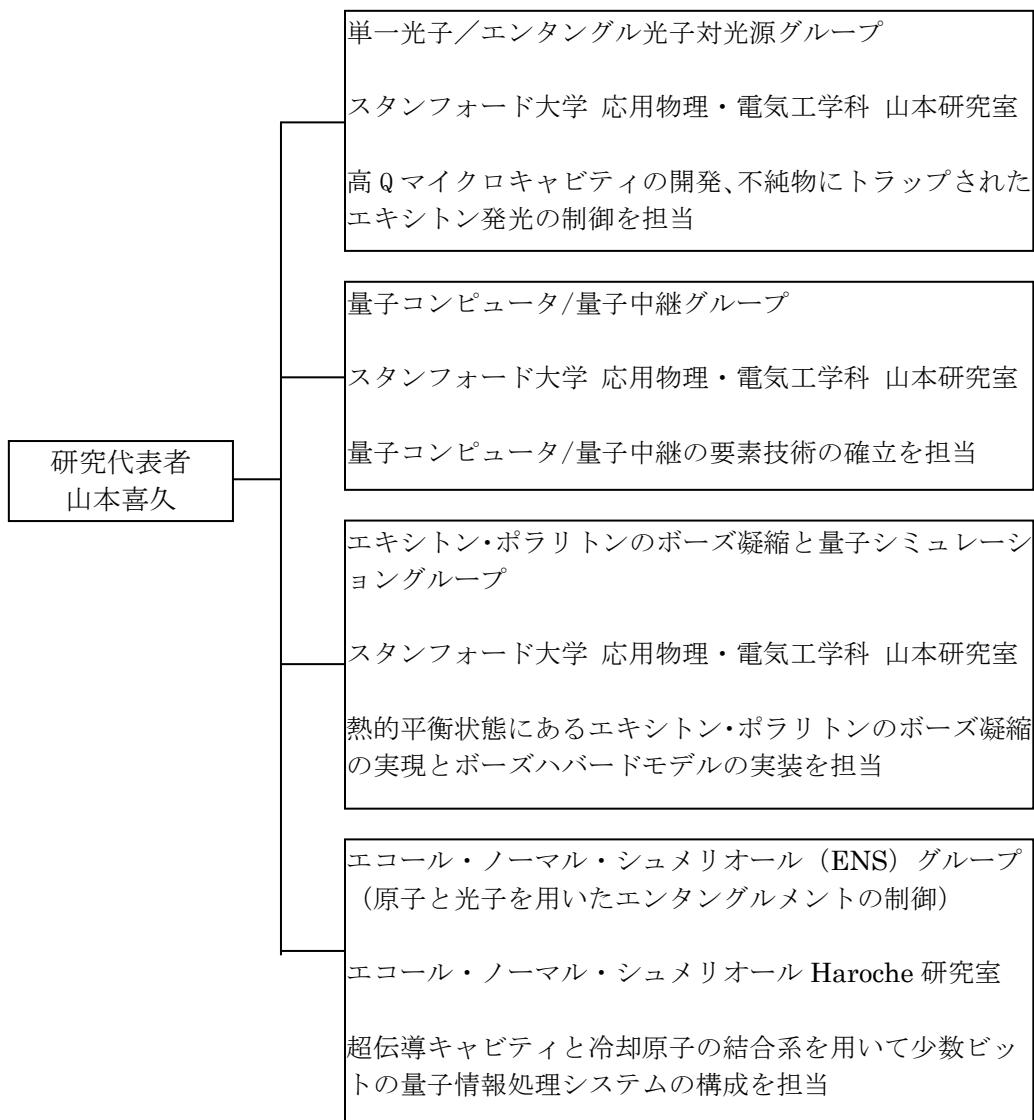
これまでに確立された光子数の量子非破壊測定法やシュレジンガーの猫状態の生成法を更に発展させ、より不思議な光の量子状態の探索を行うことができる。たとえば、2 つの共振器に同時にまたがって存在する NOON 状態や量子フィードバックを用いた任意の光の状態の生成などの挑戦的なテーマが今後の実験の具体的目標である。

## 5. 類似研究の国内外の研究動向・状況と本研究課題の位置づけ

- 1) 単一量子ドットとマイクロキャビティー間の強結合状態の実現では、Cal. Tech グループ、Wurzburg グループに先を越され、一歩遅れた格好となった。
- 2) 一方、この系からの単一光子の発生実験では、我々はチューリッヒ工科大学のグループとタイであった。
- 3) 単一量子ドットマイクロキャビティーからの時系列の識別できない単一光子の発生には我々が一番乗りであった。（この実験は、中性原子やトラップイオンを用いた実験に先立って行われた。）
- 4) 2つの異なった固体単一光子光源から識別できない単一光子を発生させたのは我々が一番乗りであった。（しかし、この実験に先立って、2つの中性原子、2つのトラップイオンからの同様の実験はすでに成功していた。）
- 5) 単一の極短光パルスを用いた電子 спинの制御の原理、実証実験はともに我々のものが初めてであった。
- 6) 励起子ポラリントラップ中の BEC 実現は、ピッツバーグ大学のグループとタイであった。
- 7) 励起子ポラリトンを用いた量子シミュレーションは、我々の実験が初めてのものであった。
- 8) 励起子ポラリトンでの超流動現象の観測は、フランス・グルノーヴル/スイス・ロザンヌの共同研究チームとタイであった。

## 6. 研究実施体制

### (1) 体制



(2) メンバー表

① 研究総括・管理

氏名	所属	役職	研究項目	研究参加期間			
				開始		終了	
				年	月	年	月
山本 喜久	スタンフォード大学 電子工学科&応用 物理学科	教授	研究総括・管理	16	1	21	3
八角 真由美	スタンフォード大学 ギンズトン研究所	事務員	研究管理	16	1	16	5
Peterman 百合香	スタンフォード大学 ギンズトン研究所	事務員	研究管理	16	1	21	3
佐々木 理恵子	スタンフォード大学 ギンズトン研究所	事務員	研究管理	16	5	21	3
Rinaldi 美智代	スタンフォード大学 ギンズトン研究所	事務員	研究管理	17	6	18	2

② 単一光子／エンタングル光子対光源

氏名	所属	役職	研究項目	研究参加期間			
				開始		終了	
				年	月	年	月
Bingyang Zhang	スタンフォード大学 ギンズトン研究所	研究員	InAs 量子ドットの MBE 成長	16	1	20	3
Charles Santori	スタンフォード大学 応用物理学科	博士課程 修了	量子メモリ	16	1	17	1
David Fattal	スタンフォード大学 物理学科	博士課程 修了	単一光子光源	16	1	17	10
Eleni Diamanti	スタンフォード大学 電子工学科	博士課程 修了	単一光子検出	16	1	18	6
Kai-Mei Fu	スタンフォード大学 応用物理学科	博士課程 修了	不純物エキシトン分光	16	1	19	6
Jocelyn Plant	スタンフォード大学 応用物理学科	修士課程 修了	電流注入型単一光子光源	16	1	16	12
Glenn Solomon	スタンフォード大学 ギンズトン研究所	研究員	GaAs/AlAs マイクロキャビティ作成	16	1	17	4
Chia-Yu Chen	スタンフォード大学 電子工学科	M2	単一光子光源	17	10	18	8
Susan Clark	スタンフォード大学 応用物理学科	D5	GaAs 中の不純物束縛励起子の光学評価	17	4	21	3
David Press	スタンフォード大学 応用物理学科	D5	量子井戸アイランド・ドットの評価	17	4	21	3
Qiang Zhang	スタンフォード大学 ギンズトン研究所	ポスドク	量子暗号、単一光子検出	18	9	21	3
Kai Wen	スタンフォード大学 応用物理学科	D2	量子暗号の安全性理論	19	10	21	3
Kristiaan De Greve	スタンフォード大学 電子工学科	D4	電子一核スピノン 2 重共鳴	18	9	21	3

③ 量子コンピュータ／量子中継

氏名	所属	役職	研究項目	研究参加期間			
				開始		終了	
				年	月		
山口 文子	スタンフォード大学 ギンズトン研究所	研究員	トポロジカル量子コンピュータ理論	16	1	18	3
Thaddeus Ladd	スタンフォード大学 および国立情報学研究所	ポスドク	デコヒーレンス特性評価	16	1	21	3
佐中 薫	スタンフォード大学 および国立情報学研究所	ポスドク	ZnSe 不純物エキシトン分光	16	6	21	3
Jonathan Goldman	スタンフォード大学 物理学科	博士課程修了	磁場勾配評価	16	1	17	10
Anne Verhulst	スタンフォード大学 電子工学科	博士課程修了	光ポンピング、光検出	16	1	17	3
Cyrus Master	スタンフォード大学 電子工学科	博士課程修了	量子シミュレータ	16	1	18	6
小関 慎一	スタンフォード大学 電子工学科	D6	光ポンピング、光検出	16	1	20	3
Young Chul Jun	スタンフォード大学 応用物理学科	D2	散逸構造量子コンピュータ	17	10	18	12
Darlin Sleiter	スタンフォード大学 電子工学科	D3	Si 中の不純物エキシトン分光	19	1	21	3
Jason Pelc	スタンフォード大学 電子工学科	D1	GaAs 中の不純物エキシトン分光	19	1	19	3
Katsuya Nozawa	スタンフォード大学 ギンズトン研究所	客員研究員	Si 中の不純物エキシトン分光	17	10	19	10
Tomoyuki Horikiri	スタンフォード大学 および国立情報学研究所	ポスドク	Si 中の核スピン、電子スピンの光学測定	19	5	21	3
Leo Yu	スタンフォード大学 電子工学科	D1	半導体スピンの集積回路技術	20	9	21	3

④ エキシトン・ポラリトンのボーズ凝縮/量子シミュレーション

氏名	所属	役職	研究項目	研究参加期間			
				開始		終了	
				年	月		
Gregor Weihs	スタンフォード大学 ギンズトン研究所	研究員	ZnSe, GaN エキシトン・ポラリトン	16	1	16	5
Hui Deng	スタンフォード大学 応用物理学科	博士課程修了	GaAs エキシトン・ポラリトン	16	1	18	8
Na Young Kim	スタンフォード大学 ギンズトン研究所	ポスドク	カーボン・ナノチューブ実験	16	1	21	3
Stephan Gotzinger	スタンフォード大学 ギンズトン研究所	ポスドク	ZnSe, GaN エキシトン・ポラリトン	16	5	18	3
Patrik Recher	スタンフォード大学 ギンズトン研究所	研究員	カーボン・ナノチューブ理論	16	6	18	9
Neil Na	スタンフォード大学 電子工学科	D5	GaAs2 次元電子ガスを用いた量子シミュレータ	17	10	20	6
Lin Tian	スタンフォード大学 ギンズトン研究所	ポスドク	量子シミュレーション	19	1	20	4
Chi-Wei Lai	スタンフォード大学	ポスドク	量子シミュレーション	18	10	19	1

	および国立情報学研究所						
Micheal Fraser	スタンフォード大学 ギンズトン研究所	ポスドク	量子相転移	19	1	21	3
Georgios Roumpos	スタンフォード大学 物理学科	D5	散逸構造量子コンピュータ	17	1	21	3
Nitsche Wolfgang	スタンフォード大学 電子工学科	D1	電流励起ポラリトレンザーの開発	20	9	21	3

⑤ エコール・ノーマル・シュメリオール (ENS)

氏名	所属	役職	研究項目	研究参加期間			
				開始		終了	
				年	月	年	月
Serge Haroche	ENS	教授	総括	16	1	21	3
Jean-Michel Raimond	ENS	教授	共振器 QED 原子チップ	16	1	21	3
Michel Brune	ENS	研究員	共振器 QED 実験総括	16	1	21	3
Valerie Lefevre	ENS	研究員	マイクロ球共振器 QED	16	1	16	3
Jean Hare	ENS	助教授	マイクロ球共振器 QED	16	1	16	3
Gilles Nogues	ENS	助教授	原子チップ回路 実験総括	16	1	21	3
Perola Milman	ENS	ポスドク	量子光学理論	16	1	16	9
Stefan Kuhr	ENS	ポスドク	原子チップ回路	16	11	18	10
Angie Quarry	ENS	ポスドク	原子チップ回路	16	11	18	10
Christine Guerlin	ENS	D3	共振器 QED	16	9	19	12
Thomas Nierrengarten	ENS	D3	原子チップ回路	16	9	19	11
Alexia Anffevens	ENS	大学院生	原子-共振器 QED	16	1	16	9
Sebastien Gleyzes	ENS	大学院生	原子-共振器 QED	16	1	18	9
Philippe Hyafil	ENS	大学院生	原子-共振器 QED	16	1	17	9
Paolo Maioli	ENS	大学院生	原子-共振器 QED	16	1	16	9
Tristan Meunier	ENS	大学院生	原子-共振器 QED	16	1	16	11
John Mozley	ENS	大学院生	原子-共振器 QED	16	1	17	9
Cédric Roux	ENS	D3	原子-共振器 QED	17	9	20	7
Adrian Lupascu	ENS	ポスドク	原子チップ回路 実験	19	6	21	3
Igor Dotsenko	ENS	ポスドク	共振器 QED 実験	19	4	21	3
Julien Bernu	ENS	D3	共振器 QED	17	5	20	8
Andreas Emmert	ENS	D3	原子チップ回路	18	3	21	3
Samuel Deleglise	ENS	D3	共振器 QED	18	9	21	3
Clement	ENS	D2	共振器 QED	19	7	21	3

Sayrin							
Xingxing Zhou	ENS	D1	共振器 QED	20	8	21	3
Jonas Mlynek	ENS	diplom	原子チップ回路	20	8	21	3

## 7. 研究期間中の主な活動

### (1) ワークショップ・シンポジウム等

年月日	名称	場所	参加人数	概要
10/16-19, 2006	US-Japan Workshop on Quantum Information Science	Maui, Hawaii	70	量子情報技術に関する研究を推進する日本国内の研究代表者および米・欧・豪から世界トップレベルの研究代表者、ならびに日・米・欧の主要政府支援機関代表者を結集させ、最新の研究成果について討論し意見交換するとともに、各政府支援機関および各研究代表者の相互協力を促進することを目的としたワークショップである。
11/25-28, 2009	国際シンポジウム -量子技術に関する物理-	奈良県新公会堂	350	量子技術に関する研究を推進する研究代表者およびそのライバルたる海外トップ級の研究者を一堂に集め、最新の研究成果を持ち寄り討論するとともに、これからの中量子技術に関する研究・技術開発の方向を考えるためのシンポジウムである。

### (2) 招聘した研究者等

氏名（所属、役職）	招聘の目的	滞在先	滞在期間
なし			

## 8. 発展研究による主な研究成果 <Stanford>

(1) 論文発表 (英文論文 54 件 邦文論文 4 件)

1. D. Fattal, K. Inoue, J. Vuckovic, C. Santori, G. S. Solomon, and Y. Yamamoto, "Entanglement Formation and Violation of Bell's Inequality with a Semiconductor Single Photon Source", Phys. Rev. Lett. 92, 037903-1 - 037903-4 (January 2004).
2. D. Fattal, E. Diamanti, K. Inoue, and Y. Yamamoto, "Quantum Teleportation with a Quantum Dot Single Photon Source", Phys. Rev. Lett. 92, 037904-1 - 037904-4 (January 2004).
3. E. Waks, E. Diamanti, B. C. Sanders, S. D. Bartlett, and Y. Yamamoto, "Direct Observation of Nonclassical Photon Statistics in Parametric Down-Conversion", Phys. Rev. Lett. 92, 113602-1 - 113602-4 (March 2004).
4. K. C. Fu, T. D. Ladd, C. Santori, and Y. Yamamoto, "Optical Detection of the Spin State of a Single Nucleus in Silicon", Phys. Rev. B. 69, 125306-1 - 125306-5 (March 2004).
5. G. Weihs, H. Deng, D. Sone, and Y. Yamamoto, "Polariton Lasing in a Microcavity", Physica Status Solidi 201, Issue 4, 625-632 (March 2004).
6. C. Santori, D. Fattal, J. Vuckovic, G. S. Solomon, E. Waks, and Y. Yamamoto, "Sub-Microsecond Correlations in Photoluminescence from InAs Quantum Dots", Phys. Rev. B 69, 205324 (May 2004).
7. C. Santori, D. Fattal, J. Vuckovic, G.S. Solomon, and Y. Yamamoto, "Generation of single photons and correlated photon pairs using InAs quantum dots", Fortschritte der Physik 52, 1180-1188 (November, 2004).
8. T. Ladd, D. Maryenko, Y. Yamamoto, E. Abe and K. M. Itoh, "Coherence time of decoupled nuclear spins in silicon", Phys. Rev. B 71, 014401 (January 2005).
9. A. Dana and Y. Yamamoto, "Electrostatic force spectroscopy of near surface localized states", Institute of Physics Publishing, Nanotechnology 16, S125-133 (February 2005).
10. Y. Yamamoto, "Quantum information", Science Journal Kagaku 75, 313-315 (March 2005).
11. Y. Yamamoto, C. Santori, G. Solomon, J. Vuckovic, D. Fattal, E. Waks, and E. Diamanti, "Single photons for quantum information systems", Progress in Informatics 1, 5-37 (April 2005).
12. A. Verhulst, Y. Yamamoto, and K. Ito, "Optical Pumping of  $^{29}\text{Si}$  Nuclear Spins in Bulk Silicon at High Magnetic Field and Liquid Helium Temperature", Phys. Rev. B, 71, 235206 (June 2005).
13. B. Zhang, G.S. Solomon, M. Pelton, and Y. Yamamoto, "Epitaxial growth and optical characterization of triggered single photon materials", Recent Research Developments in Crystal Growth 4, 187-210 (June 2005).
14. C. Langrock, E. Diamanti, R. Rousset, H. Takesue, Y. Yamamoto, M.M. Fejer, "Highly efficient single-photon detection at communication wavelengths by use of upconversion in reverse-proton-exchanged periodically poled LiNbO<sub>3</sub> waveguides", Optics Letters 30, 1725 (July 2005).
15. C. Santori, Y. Yamamoto, S. Gotzinger, S. Kako, K. Hoshino, and Y. Arakawa, "Photon

Correlation Studies of Single GaN Quantum Dots”, Applied Physics Letters 87, 051916 (July 2005).

16. D. Englund, D. Fattal, E. Waks, G. Solomon, B. Zhang, T. Nakaoka, Y. Arakawa, Y. Yamamoto, and J. Vukovic, “Controlling the Spontaneous Emission Rate of Single Quantum Dots in a Two-Dimensional Photonic Crystal”, Phys. Rev. Lett. 95, 013904 (July 2005)
17. Y. Yamamoto, “Single photons and entangled photon-pairs from a quantum dot”, Optronics 9, 134-144 (September 2005) (Japanese Journal)
18. K.C. Fu, C. Santori, C. Stanley, M.C. Holland, Y. Yamamoto, “Coherent Population Trapping of Electron Spins in a High-Purity n-Type GaAs Semiconductor”, Phys. Rev. Lett 95, 187405 (October 2005)
19. E. Diamanti, H. Takesue, T. Honjo, K. Inoue, Y. Yamamoto, “Performance of various quantum key distribution systems using 1.55 um up-conversion single-photon detectors”, Phys. Rev. A 72, 052311 (November 2005)
20. H. Takesue, E. Diamanti, T. Honjo, C. Langrock, M. M. Fejer, K. Inoue, Y. Yamamoto, “Differential phase shift quantum key distribution experiment over 105-km fibre”, New Journal of Physics 7, 232 (November 2005)
21. Y. Yamamoto, “Quantum Physics II, Interdisciplinary Fields between Physics and Engineering”, The Journal of The Physical Society of Japan 60, 928-934 (December 2005)
22. E. Waks, E. Diamanti, and Y. Yamamoto, “Generation of Photon Number States”, New Journal of Physics 8, 4 (January 2006)
23. E. Waks, H. Takesue, and Y. Yamamoto, “Security of differential-phase-shift quantum key distribution against individual attacks”, Phys. Rev. A 73, 012344 (January 2006)
24. P. van Loock, T. D. Ladd, K. Sanaka, F. Yamaguchi, K. Nemoto, W. J. Munro, and Y. Yamamoto, “Hybrid Quantum Repeater Using Bright Coherent Light”, Phys. Rev. Lett. 96, 240501 (June 2006)
25. F. Yamaguchi, K. Nemoto, W.J. Munro, “Quantum error correction via robust probe modes”, Phys. Rev. A 73, 060302 (June 2006)
26. H. Deng, D. Press, S. Goetzinger, G.S. Solomon, R. Hey, K.H. Ploog and Y. Yamamoto, “Quantum Degenerate Exciton-Polaritons in Thermal Equilibrium”, Phys. Rev. Lett. 97, 146402 (June 2006)
27. Y.C. Neil Na and Y. Yamamoto, "Time-domain simulation of Schrödinger equation to determine the effective potential induced by an oscillating standing wave", J. Appl. Phys. 100, 044901 (August 2006)
28. Y.C. Neil Na and Y. Yamamoto, "Solid state ion trap: lateral trapping of quantum well excitons by oscillating piezoelectric field", Solid State Comm. 140, 28 (August 2006)
29. T. D. Ladd, P. van Loock, K. Nemoto, W. J. Munro and Y. Yamamoto, "Hybrid Quantum Repeater Based on Dispersive CQED Interactions between Matter Qubits and Bright Coherent Light", New Journal of Physics 8 184 (September 2006)
30. K.C. Fu, W. Yeo, S. Clark, C. Santori, C. Stanley, M.C. Holland, and Y. Yamamoto “Millisecond spin-flip times of donor-bound electrons in GaAs”, Phys. Rev. B 74, 121304 (September 2006)

31. H. Takesue, E. Diamanti, C. Langrock, M.M. Fejer, and Y. Yamamoto, "10-Ghz clock differential phase shift quantum key distribution experiment", Optics Express 14, 9522 (October 2006)
32. Y. Yamamoto, "Quantum communication and information processing with quantum dots," Quantum Information Processing, Springer 5, 299 (October 2006)
33. Y. Yamamoto, "Optical Quantum Information Science," Kagaku 76, 1037 (October 2006) [in Japanese]
34. Y. Yamamoto, "Quantum information technology: present and future prospects", Oyo Buturi 75, 1307 (November 2006)
35. S. Kako, C. Santori, K. Hoshino, S. Gotzinger, Y. Yamamoto and Y. Arakawa, "A gallium nitride single-photon source operating at 200 K" Nature Materials 5, 887–892 (November 2006)
36. E. Diamanti, H. Takesue, C. Langrock, M.M. Fejer, and Y. Yamamoto, "100 km differential phase shift quantum key distribution experiment with low jitter up-conversion detectors", Opt. Express 14, 13073 (December 2006)
37. G. Roumpos, C. P. Master, and Y. Yamamoto, "Quantum simulation of spin ordering with nuclear spins in a solid state lattice", Phys. Rev. B 75, 094415 (March 2007)
38. D. Press, S. Goetzinger, S. Reitzenstein, C. Hofmann, A. Loeffler, M. Kamp, A. Forchel, and Y. Yamamoto, Photon Antibunching from a Single Quantum Dot-Microcavity System in the Strong Coupling Regime, Phys. Rev. Lett. 98, 117402 (March 2007)
39. B. Ellis, I. Fushman, D. Englund, B. Zhang, Y. Yamamoto, and J. Vuckovic, "Dynamics of Quantum Dot Photonic Crystal Lasers", Applied Physics Letter, 90, 151102 (April, 2007)
40. D. Englund, A. Faraon, B. Zhang, Y. Yamamoto, and J. Vuckovic, "Generation and transfer of single photons on a photonic crystal chip", Optics Express, 15, 5550, (April, 2007)
41. H. Takesue, S.W. Nam, Q. Zhang, R.H. Hadfield, T. Honjo1, K. Tamaki1, and Y. Yamamoto, "Quantum key distribution over 40 dB channel loss using superconducting single photon detectors", Nature Photonics 1, 343 (June, 2007)
42. S.M. Clark, K.C. Fu, T. Ladd, and Y. Yamamoto, "Quantum Computers Based on Electron Spins Controlled by Ultrafast Off-Resonant Single Optical Pulses", Phys. Rev. Lett. 99, 040501 (July, 2007)
43. T. Byrnes, P. Recher, N.Y. Kim, S. Utsunomiya, Y. Yamamoto, "Quantum simulator for the Hubbard model with long-range Coulomb interactions using surface acoustic waves",Phys. Rev. Lett. 99, 016405 (July, 2007)
44. N.Y. Kim, P. Recher, W.D. Oliver, Y. Yamamoto, J. Kong, H. Dai, "Tomonaga-Luttinger Liquid Features in Ballistic Single-Walled Carbon Nanotubes: Conductance and Shot Noise", Phys. Rev. Lett. 99, 036802 (July, 2007)
45. Q. Zhang, X. Xie, H. Takesue, S.W. Nam, C. Langrock, M. Fejer, Y. Yamamoto, "Correlated photon-pair generation in reverseproton-exhange PPLN waveguides with integrated mode demultiplexer at 10 GHz clock",Optics Express 15, 10288 (August, 2007)
46. H. Deng, Glenn S. Solomon, Rudolf Hey, Klaus H. Ploog, and Yoshihisa Yamamoto, "Spatial Coherence of a Polariton Condensate", Phys. Rev. Lett. 99, 126403 (September,

2007)

47. C. W. Lai, N. Y. Kim, S. Utsunomiya, G. Roumpos, H. Deng, M. D. Fraser, T. Byrnes, P. Recher, N. Kumada, T. Fujisawa, Y. Yamamoto, "Coherent zero-state and  $\pi$ -state in an exciton-polariton condensate array", *Nature* 450, 529 (November 2007)
48. Q. Zhang, C. Langrock, H. Takesue, X. Xie, M.M. Fejer, Y. Yamamoto, "Generation of 10 GHz clock sequential time-bin entanglement", *Optic Express* 16, 3293 (March 2008)
49. Y.C. Neil Na, S. Utsunomiya, L. Tian and Y. Yamamoto, "Strongly correlated polaritons in a two-dimensional array of photonic crystal microcavities", *Phys. Rev. A*, 77 031803 (March 2008)
50. Q. Zhang, H. Takesue, S.W. Nam, C. Langrock, X. Xie, B. Baek, M. M. Fejer, and Y. Yamamoto, "Distribution of Time-Energy Entanglement over 100 km fiber using superconducting single-photon detectors" *Optic Express* 16, 5776 (April 2008)
51. N. Y. Kim, C. W. Lai, S. Utsunomiya, G. Roumpos, M. Fraser, H. Deng, T. Byrnes, P. Recher, N. Kumada, T. Fujisawa, and Y. Yamamoto, "GaAs microcavity exciton-polaritons in a trap", *Phys. Stat. Sol. (b)* 245, 1076 (May, 2008)
52. T. Byrnes, N. Y. Kim, K. Kusudo, and Y. Yamamoto, "Quantum simulation of Fermi-Hubbard models in semiconductor quantum-dot arrays", *Phys. Rev. B*, 78, 075320 (August, 2008)
53. S. Utsunomiya, L. Tian, G. Roumpos, C.W. Lai, N. Kumada, T. Fujisawa, M. Kuwata-Gonokami, A. Löffler, S. Höfling, A. Forchel and Y. Yamamoto "Observation of Bogoliubov excitations in exciton-polariton condensates", *Nature Physics* 4, 700 - 705 (September 2008)
54. K.C. Fu, C. Santori, S.M. Clark, C. Stanley, M.C. Holland, Y. Yamamoto "Ultrafast control of donor-bound electron spins with single detuned optical pulses", *Nature Physics* 4, 780 - 784 (October 2008)
55. D. Press, T.D. Ladd, B. Zhang, and Y.Yamamoto "Complete quantum control of a single quantum dot spin using ultrafast optical pulses", *Nature* 456, 218 – 221 (November 2008)
56. T. Honjo, S. W. Nam, H. Takesue, Q. Zhang, H. Kamada, Y. Nishida, O.Tadanaga, M. Asobe, B. Baek, R. Hadfield, S. Miki, M. Fujiwara, M. Sasaki, Z. Wang, K. Inoue and Y. Yamamoto, "Long-distance entanglement-based quantum key distribution over optical fiber", *Optics Express* 16, 19118-19126 (November 2008)
57. Q. Zhang, C. Langrock, M. M. Fejer, and Y. Yamamoto, "Waveguide-based single-pixel up-conversion infrared spectrometer," *Optics Express* 16, 19557-19561 (November 2008)
58. S. Koseki, B. Zhang, K. De Greve, and Y. Yamamoto, " Monolithic integration of quantum dot containing microdisk microcavities coupled to air-suspended waveguides," *Appl. Phys. Lett.* 94, 051110 (February 2009)

(2) 口頭発表

①学会

国内 29 件, 海外 83 件

1. Y. Yamamoto, "Generation and Application of Single Photons", Joint Symposium on Photonic Crystal and Quantum Dot, Tokyo, Japan (April 19-20, 2004)
2. F. Yamaguchi, T. D. Ladd, J. R. Goldman, A. Verhulst, C. P. Master, K. Fu, C. Santori, S. Koseki, and Y. Yamamoto, "Solid-State Crystal Lattice NMR Quantum Computer", DARPA Quantum Information Science and Technology (QuIST) Review Meeting and Workshop - Scalability/Error Control, Chicago, IL (May 4-7, 2004)
3. Y. Yamamoto, "Single Photons and Entangled Photons for Quantum Information Systems,"Workshop on "Quantum Optics for Quantum Information Processing", Rome, Italy (May 7-8, 2004)
4. E. Diamanti, E. Waks, and Y. Yamamoto, "Generation of Photon Number States", Conference on Lasers and Electro Optics/International Quantum Electronics Conference (CLEO/IQEC 2004), San Francisco, CA (May 16-21, 2004).
5. C. Santori, D. Fattal, J. Vuckovic, G. S. Solomon, Y. Yamamoto, "Single-Photon Generation with Optically Excited Quantum Dots", Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference (CLEO/IQEC 2004), San Francisco, CA (May 16-21, 2004)
6. Y. Yamamoto, "Dynamic Condensation of Exciton Polaritons", International Conference on Spontaneous Coherence in Excitonic Systems (ICSCE), Pittsburgh, PA (May 24-28, 2004)
7. H. Deng, G. Weihs, Y. Yamamoto, D. Snoke, J. Bloch, "Polariton Lasing in a Semiconductor Microcavity", International Conference on Spontaneous Coherence in Excitonic Systems (ICSCE), Pittsburgh, PA (May 24-28, 2004).
8. Y. Yamamoto, H. Deng, and G. Weihs, "Dynamic Condensation of Exciton Polaritons", Boulder Summer School for Condensed Matter and Material Physics, Boulder, CO (July 20, 2004).
9. Y. Yamamoto, "Indistinguishable Single Photons and Entangled Photon-Pairs from a Quantum Dot Initialization, Manipulation and Detection of Nuclear Spins in Solids", Okinawa Summer School on Quantum Information, Okinawa, Japan (August 1-2, 2004).
10. Y. Yamamoto, "Indistinguishable Single Photons and Entangled Photon-Pairs from a Quantum Dot Initialization, Manipulation and Detection of Nuclear Spins in Solids", Cargese Summer School on Quantum Logic and Communications, Corsica, France (August 26-27, 2004).
11. E. Waks, E. Diamanti, Y. Yamamoto, "Photon Number Generation with the Visible Light Photon Counter", SPIE Annual Meeting 2004, Optical Science and Technology, Denver, CO (August 5, 2004).
12. D. Fattal, K. Inoue, E. Diamanti, C. Santori, E. Waks, G.S. Solomon, J. Vuckovic, Y. Yamamoto, "Quantum Information Processing with a Quantum Dot Single Photon Source", 2004 SPRC Annual meeting, Stanford, CA (September 13, 2004).

13. Langrock, E. Diamanti, R. Roussev, M. Fejer, Y. Yamamoto, "Efficient single-photon detection at communications wavelengths using a fiber-coupled RPE PPLN waveguide device", 2004 SPRC Annual meeting, Stanford, CA (September 13 and 14, 2004).
14. Y. Yamamoto, "Indistinguishable single photons and entangled photon-pairs from a quantum dot", JST symposium on Quantum Information Processing, Tokyo, Japan (December 20-21, 2004).
15. Y. Yamamoto, "Dynamic Condensation of Exciton Polaritons", 35th Winter Colloquium on the Physics of Quantum Electronics, Snowbird, UT (January 2-6, 2005).
16. D. Fattal, Y. Yamamoto, T. S. Cubitt, S. Bravyi, I. L. Chuang, "Entanglement of stabilizer states", QIP 2005 The Eighth Workshop on Quantum Information Processing, Boston, MA (January 15, 2005).
17. Y. Yamamoto, "Quantum phase transition in exciton polariton system", ESF-JSPS Frontier Science Conference, Kanagawa, Japan (March 12-18, 2005).
18. S. Goestzinger, C. Santori, Y. Yamamoto, S. Kato, K. Hoshino, and Y. Arakawa, "A gallium nitride single photon source", American Physical Society, Los Angeles, CA (March 21, 2005)
19. N. Kim, W. Oliver, Y. Yamamoto, Y. Hirayama, "Shot Noise Suppression at Non-integer Conductance Plateaus in a Quantum Point Contact," American Physical Society March Meeting 2005, Los Angeles, CA (March 21, 2005)
20. N. Kim, W. Oliver, Y. Yamamoto, Y. Hirayama, "Quantum Shot Noise Suppression in Single-walled Carbon Nanotubes," American Physical Society March Meeting 2005, Los Angeles, CA (March 22, 2005)
21. Y. Yamamoto, "Indistinguishable single photons and entangled photons from a quantum dot", JPS annual meeting, Chiba, Japan (March 24-27, 2005).
22. Y. Yamamoto, "Nuclear spin quantum memory in semiconductors", DARPA Quantum Information Science and Technology (QuIST) Program Review, Augustine, FL (April 5-7, 2005).
23. Y. Yamamoto, "Quantum communication and information processing with single QDs in microcavities", MURI Wrap-up Workshop, College Park, MD (April 27-28, 2005).
24. Y. Yamamoto, "Quantum communication and information processing with quantum dots", Quantum Physics of Nature & 6th European QIPC Workshop, Vienna, Austria (May 22-26, 2005).
25. E. Diamanti, C. Langrock, H. Takesue, M.M. Fejer, Y. Yamamoto, "1.5  $\mu$ m photon-counting optical time domain reflectometry with a single-photon detector using up-conversion in a PPLN waveguide", CLEO/QELS Technical Conference, Baltimore, MD (May 24, 2005).
26. C. Langrock, E. Diamanti, R.V. Roussev, H. Takesue, Y. Yamamoto, M.M. Fejer, "Highly efficient single-photon detection at communication wavelengths using up-conversion in reverse proton exchanged PPLN waveguides", CLEO/QELS Technical Conference, Baltimore, MD (May 26, 2005).

27. Y. Yamamoto, "Quantum Communication and Information Processing with Quantum Dots" and "Quantum Phase Transition in Exciton Polariton Systems", BaCaTec-Summer School, Semiconductor nanophotonics-technologies, physics and applications, Würzburg, Germany (June 30, 2005).
28. Y. Yamamoto, "Quantum Information System Experiments Using a Single Photon Source and Detector", IQEC/CLEO-PR2005, Q2 QFD3, Tokyo, Japan (July 11-15, 2005).
29. Y. Yamamoto, "Quantum information system experiments using a single photon source ", SPINTECH III, Hyogo, Japan (August 1-5, 2005)
30. Y. Yamamoto, "Quantum repeaters based on coherent states", DARPA Workshop on Quantum Information Science, Arlington, VA (August 15, 2005)
31. Y. Yamamoto, "Cavity QED with single excitons and ensemble of excitons", ISQM TOKYO 2005, Tokyo, Japan (August 24, 2005)
32. Y. Yamamoto, "Quantum Information System Experiments using a Single Photon Source", Kochi Summer School Quantum Information Science, Kochi, Japan (September 6, 2005)
33. H. Deng, D. Press, Y. Yamamoto, G. Solomon, R. Hey, and K. H. Ploog. "Thermal Equilibrium Condensation of Polaritons?", OECS9&ICSCE2 (the 9th Conference on the Optics of Excitons in Confined Systems, and the 2nd Conference on Spontaneous Coherence in Excitonic Systems), Southampton, UK (September 9, 2005)
34. E. Diamanti, H. Takesue, T. Honjo, C. Langrock, M. M. Fejer, K. Inoue, Y. Yamamoto, "Fast and long-distance differential phase shift quantum key distribution", SPRC Annual Symposium 2005, Stanford, CA (September 19, 2005)
35. Y. Yamamoto, "Coherent Emission and Trapping of Single Photons in Cavity-QED Systems", Fitzpatrick Center's 2005 Fall Seminar Series at Duke University, Durham, NC (September 20, 2005)
36. Y. Yamamoto, "Differential Phase Shift Quantum Key Distribution and Beyond", MIT Stanford UC Berkeley Nanotechnology Forum, Moffett Field, CA (October 20, 2005)
37. Y. Yamamoto, "Center for Photonic Quantum Information Systems", MURI Review Meeting, Urbana, IL (November 1, 2005)
38. Y. Yamamoto, "Solid State implementation of quantum repeaters for long distance quantum communication", Workshop on Quantum Repeaters for Long-Distance Quantum Communication, Cambridge, MA (November 3, 2005)
39. Y. Yamamoto, "Is atomic physics implementable in semiconductor systems?", 357. Wilhelm und Else Heraeus-Seminar, The Photon: Generation, Detection, and Application, Berlin, Germany (November 08, 2005)
40. Y. Yamamoto, "Introduction to Quantum Information Science and Technology", JST CREST Annual Review Meeting, Hakone, Japan (December 12, 2005)
41. Y. Yamamoto, "Cavity QED Network Connected by Coherent States", Frontiers in

Nanoscale Science and Technology, San Francisco, CA (January 28, 2006)

42. Y. Yamamoto, "Quantum Communication and Quantum Computation by Cavity QED Node and Coherent State Bus", Quantum computing and many-body systems International conference, Key West, FL (February 2, 2006)
43. T.D. Ladd, "Practical Quantum Repeater Using Intense Coherent Light", Southwest Quantum Information and Technology, Albuquerque, NM (February 17, 2006)
44. Y. Yamamoto, "Is Clean Atomic Physics Implementable in Semiconductor Systems?", The Forth International Symposium on Nanotechnology, Tokyo, Japan (February 21, 2006)
45. Y. Yamamoto, "Quantum optics and quantum information processing with solid state systems", 2006 APS Meeting, Baltimore, MD (March 14, 2006)
46. K. Fu, S.M. Clark, C. Santori, B. Zhang, C. Stanley, M.C. Holland, Y. Yamamoto, "Electron dephasing and decoherence of neutral donor bound electrons in GaAs", 2006 APS Meeting, Baltimore, MD (March 16, 2006)
47. T.D. Ladd, "Practical Quantum Repeater Using Intense Coherent Light", Workshop on Linear Optical Quantum Information Processing, LOQuIP 2006, Baton Rouge, LA (April 10, 2006)
48. Y. Yamamoto, "Prospect of Micro-optic Devices for Quantum Information Processing Technology", 100th Micro Optics Workshop, Tokyo, Japan (May 16, 2006)
49. E. Diamanti, C. Langrock, E. Waks, M. M. Fejer, Y. Yamamoto, H. Takesue, T. Honjo, K. Inoue, "Fast and Long Distance Differential Phase Shift Quantum Key Distribution", CLEO/QELS 06, JTUh2, Long Beach, CA (May 23, 2006)
50. Y. Yamamoto, "Quantum information and nano-photonics", Nano-optics and electronics device symposium, Tokyo, Japan (May 29, 2006)
51. Y. Yamamoto, "Information and Communication Technology supported by Quantum Information Science", NICT Optical Network Basic Technology Symposium, Tokyo, Japan (June 21, 2006)
52. Y. Yamamoto, "Overview of ERATO Quantum Fluctuation Project", ERATO 25th Anniversary Symposium, Tokyo, Japan (June 30, 2006)
53. E. Diamanti, C. Langrock, E. Waks, M. M. Fejer, Y. Yamamoto, H. Takesue, T. Honjo, K. Inoue, "Differential phase shift quantum key distribution with up-conversion single-photon detectors", IEEE/LEOS summer Topical Meeting on Quantum communications in Telecom Networks, TuB1.1, Quebec, Canada (July 18, 2006)
54. Y. Yamamoto, E. Diamanti, H. Takesue, C. Langrock, M. M. Fejer, "Differential phase shift quantum key distribution", Conference on Quantum Information and Quantum Control II, Toronto, Canada (August 8-11, 2006)
55. Y. Yamamoto, "Quantum Information Processing with Photons and Spins", 5th Nano Science Summer School, Nagano, Japan (August 14-16, 2006)
56. Y. Yamamoto, "Quantum Information Processing with Photons and Spins", Asian

Conference on Quantum Information Science, Beijin, China (September 1-4, 2006)

57. Y. Yamamoto, "MURI Center for Photonic Quantum Information Systems", MURI Center for Photonic Quantum Information Systems Annual Meeting, Stanford, CA (October 4, 2006)
58. D. Press, S. Goetzinger, S. Reitzenstein, C. Hofmann, A. Loeffler, M. Kamp, A. Forchel, and Y. Yamamoto "Strong coupling between a single quantum dot and a pillar microcavity", A symposium on Solid State Cavity Quantum Electro Dynamics, Austin, Texas (October 6, 2006)
59. Y. Yamamoto "Quantum communication, computation and simulation based on semiconductor cavity QED qubits", UCSB Physics Colloquium, Santa Barbara, CA (October 31, 2006)
60. Y. Yamamoto "Quantum Repeater based on differential Phase shift Entanglement Distribution", The 8th International Conference on QCMC, Tsukuba, Japan (November 28-December 3, 2006)
61. Y. Yamamoto "Semiconductor Cavity QED Systems for Quantum Communication, Computation and Simulation", JST/CREST Quantum Information Workshop, Hakone, Japan (December 12-16, 2006)
62. Y. Yamamoto "Exciton Polariton BEC in GaAs MQW Microcavities", International conference on Spontaneous Coherence in Exciton Systems, Les Houches, France (January 15-19, 2007)
63. D. Press, S. Goetzinger, S. Reitzenstein, C. Hofmann, A. Loeffler, M. Kamp, A. Forchel, and Y. Yamamoto, "Photon Antibunching from a Single Quantum Dot-Microcavity System in the Strong Coupling Regime", University of Wuerzburg, Germany (February 23, 2007)
64. Y. Yamamoto "Research trend and future prospect of quantum information technology", The 2nd Nano quantum Information Electronics Seminar, Tokyo, Japan (March 05, 2007)
65. Y. Yamamoto "Quantum key distribution over 200 km fiber transmission line", French-Canadian workshop on nanophotonics, Stanford, CA (March 19, 2007)
66. Y. Yamamoto "Introduction to Quantum Communications", OFC/NFOEC 2007, Anaheim, CA (March 28, 2007)
67. Y. Yamamoto, "Quantum repeater and computation based on bound electron spins controlled by ultra-fast coherent optical pulses", Joint ITAMP and CUA workshop: Hybrid approaches to scalable quantum information systems, Cambridge, MA (May 25, 2007)
68. Y. Yamamoto, "Differential Phase shift Quantum Key Distribution", Theory and realization of practical quantum key distribution, Waterloo, Canada (June 11-14, 2007)
69. Y. Yamamoto, "Quantum Information Systems based on Donot Bound electrons and Excitons Controlled by Coherent Optical Pulses", Fundamental Optical Processes in Semiconductors FOPS 2007, Big Sky, Montana (July 23-27, 2007)

70. Y. Yamamoto, "Quantum information systems based on electron spins controlled by coherent optical pulses", The 10th Asia Pacific Physics conference, Pl8.001, Pohang, Korea (August 24, 2007)
71. Y. Yamamoto, "Quantum communication, computation and simulation based on semiconductor cavity QED systems", QuAMP 2007, London, UK (September 13, 2007)
72. C-W. Lai, G. Roumpos, S. Utsunomiya, L. Tien, and Y. Yamamoto, "Quantum simulation of Bose Hubbard model with semiconductor polaritons: Superfluid in-phase and anti-phase states", 2007 SPRC Symposium, Stanford, CA (September 15, 2007)
73. T.D. Ladd, "High speed quantum repeaters and computers based on semiconductor cavity QED", Quantum Computing Workshop, Princeton, NJ (September 20, 2007)
74. Y. Yamamoto, "Photonic quantum information systems", MURI center for photonic quantum information systems annual meeting, Stanford, CA (October 3, 2007)
75. Y. Yamamoto, "Quantum information system for which light is used", The 17th Quantum Information Technology Symposium, Okayama, Japan (November 23, 2007)
76. Y. Yamamoto, "Dynamical condensation of exciton polaritons", Joint quantum institute seminar, University of Maryland, College Park, MD (December 3, 2007)
77. C.W. Lai and Y. Yamamoto, "Spontaneous buildup of a phase-locked zero-state and pi-state in an array of exciton-polariton condensates", Photonic West, 6892-3, San Jose, CA (January 20-23, 2008)
78. Y. Yamamoto, "Dynamic condensation of exciton polaritons", Photonic The 55th spring meeting of the Japan society of applied physics, 29p-E-6, Chiba, Japan (March 29, 2008)
79. X. Xie, Q. Zhang, C. Langrock, Y. Yamamoto, M. M. Fejer, H. Takesue, and S.W. Nam, "10 GHz Repetition Rate Photon Pair Generation in Reverse-Proton-Exchange Lithium Niobate Waveguides with Mode Demultiplexing", CLEO 2007, QWF4, Baltimore, MD (May 8-10, 2007)
80. B. Zhang, S. Koseki, and Y. Yamamoto, "Growth and Characterization of GaAs Quantum Dots in Al0.3Ga0.7As Grown by Molecular-beam Epitaxy", 2007 Electronic Materials Conference, I6, Notre Dame, IN (June 22, 2007)
81. N. Y. Kim, C-W. Lai, S. Utsunomiya, G. Roumpos, H. Deng, T. Byrnes, P. Recher, N. Kumada, T. Fujisawa, and Y. Yamamoto, "GaAs microcavity exciton-polaritons in a trap", 10 th Conference on the Optics of Excitons in Confined Systems, OTu01, MessinaPatti, Italy (September 11, 2007)
82. T.D. Ladd, R. van Meter (Keio/NII), A. Fowler, B. Munro, K. Nemoto, Y. Yamamoto, "Toward Fault-Tolerance in a Quantum Computer Architecture based on Semiconductor Microphotonics", The First International Conference on Quantum Error Correction, QEC 07, Los Angeles, CA (December 20, 2007)
83. S. Utsunomiya, H. Deng, N. Kim, C.W. Lai, G. Roumpos, L. Tian, A. Loeffler, S. Hoefling, A. Forchel, and Y. Yamamoto, "Dynamical condensation of exciton-polaritons -Application to quantum optical simulators-", 8<sup>th</sup> International Conference on Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures (PLMCN8), MoA-2, p.2, Tokyo, Japan (April

7, 2008)

84. N. Y. Kim, G. Roumpos, C. W. Lai, S. Utsunomiya, N. Kumada, T. Fujisawa, A. Loeffler, S. Hoefling, A. Forchel, and Y. Yamamoto, "The effect of an electrostatic lateral potential on GaAs microcavity exciton-polaritons", 8<sup>th</sup> International Conference on Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures (PLMCN8), WeA-5, p.45, Tokyo, Japan (April 7, 2008)
85. Q. Zhang, H. Takesue, C. Langrock, X. Xie, M.M. Fejer, and Y. Yamamoto, "Hong-Ou-Mandel dip by photon pair from PPLN Waveguide", CLEO QELS 08, QFE1, p.186, San Jose, CA, USA (May 9, 2008)
86. C. W. Lai, N. Y. Kim, S. Utsunomiya, G. Roumpos, and Y. Yamamoto, "Coherent Zero-State and pi-State in an Array of Exciton-Polariton Condensates", CLEO QELS 08, QFC3, p.179, San Jose, CA, USA (May 9, 2008)
87. Y. Yamamoto, S. Utsunomiya, H. Deng, C. W. Lai, G. Roumpos, A. Loeffler, S. Hoefling, and A. Forchel, "Dynamical condensation of Exciton-Polaritons", Condensed matter physics seminar at UCSD, San Diego, CA, USA (May 28, 2008)
88. Y. Yamamoto, "Exciton-polariton Bose-Einstein condensation", 2008 Kaya Conference, Tokyo, Japan (Jun 11, 2008)
89. Y. Yamamoto, "Future Prospect of Quantum Information Technology", 13th Multi-dimension Seminar, Japan Advance Institute of Science and Technology, Ishikawa, Japan (Jun 18, 2008)
90. Y. Yamamoto, S. Utsunomiya, H. Deng, C-W. Lai, G. Roumpos, A. Loeffler, S. Hoefling, and A. Forchel, "Exciton polariton condensation in semiconductor microcavities", 2008 International Conference on Excitonic Processes in Condensed Matter, B2, Kyoto, Japan (Jun 23, 2008)
91. H. Deng, G. Weihs, R. Huang, C.W. Lai, S. Utsunomiya, G. Roumpos, A. Loeffler, S. Hoefling, A. Forchel and Y. Yamamoto, "Dynamical Condensation of Exciton-Polaritons", International School of Physics "Enrico Fermi" 2008, Course CLXXI "Quantum Coherence in Solid State Systems", Lecture 1: Coherence properties, Varenna, Italy (Jul 7, 2008)
92. G. Roumpos, H. Deng, C.W. Lai, S. Utsunomiya, and Y. Yamamoto, "Dynamical Condensation of Exciton-Polaritons", International School of Physics "Enrico Fermi" 2008, Course CLXXI "Quantum Coherence in Solid State Systems", Lecture 2: Thermodynamical properties, Varenna, Italy (Jul 7, 2008)
93. S. Utsunomiya, C.W. Lai, G. Roumpos, A. Loeffler, S. Hoefling, A. Forchel and Y. Yamamoto, "Dynamical Condensation of Exciton-Polaritons", International School of Physics "Enrico Fermi" 2008, Course CLXXI "Quantum Coherence in Solid State Systems", Lecture 3: Bogoliubov excitation and superfluidity, Varenna, Italy (Jul 8, 2008)
94. Y. Yamamoto, "Dynamical Condensation of Exciton-Polaritons", International Conference on Atomic Physics, Storrs, CT, USA, p.48 (Aug 1, 2008)
95. Y. Yamamoto, S. Utsunomiya, H. Deng, C-W Lai, G. Roumpos, A. Löffler, S. Höfling, and A. Forchel, "Exciton-polariton Bose-Einstein Condensation", International

Conference on Spontaneous Coherence in Excitonic Systems, p.28, Cambridge, UK (Sep 10, 2008)

96. Y. Yamamoto, "Differential Phase Shift Quantum Key Distribution", Quantum Network Demonstration Scientific Conference, Vienna, Austria (October 10, 2008)
97. D. Press, T.D. Ladd, B. Zhang, and Y. Yamamoto, "Complete Quantum Control of a Single Quantum Dot Spin using Ultrafast Optical Pulses", International Workshop on the Fundamentals of Light-Matter Interaction, Recife, PE, Brazil (October 20-22, 2008)
98. G. Roumpos, C-W. Lai, T. C. H. Liew, Y. G. Rubo, A. V. Kavokin, and Y. Yamamoto, "Signature of the Microcavity Exciton Polariton Relaxation Mechanism in the Polarization of Emitted Light", Frontiers in Optics 2008 Laser Science XXIV, FTu15, p.70, Rochester, NY, USA (October 21, 2008)
99. Y. Yamamoto, "Devices, Protocols and Architectures for Quantum Communication", Frontiers in Optics 2008 Laser Science XXIV, FWA2, p.84, Rochester, NY, USA (October 22, 2008)
100. Y. Yamamoto, "Bose-Einstein Condensation of Exciton-polaritons", 2008 International Symposium on Physics of Quantum Technology, 1-2, p.2, Nara, Japan (November 25-28, 2008)
101. Y. Yamamoto, "Bose-Einstein Condensation of Exciton-polaritons", The 11<sup>th</sup> Institute for Nano Quantum Information Electronics Seminar, Tokyo, Japan, (December 19, 2008)
102. T. Horikiri, G. Roumpos, S. Utsunomiya, A. Löffler, A. Forchel, and Y. Yamamoto, "Second order correlation of exciton-polariton condensates", The 39th colloquium on the physics of quantum electronics, p.130, Snowbird, Utah, USA (January 5, 2009)
103. Y. Yamamoto, "Optics and Quantum Mechanics", JST SORST Photoscience Workshop, Tokyo, Japan (January 20, 2009)
104. K. Sanaka, A. Pawlis, T.L. Ladd, K. Lischka, and Y. Yamamoto, "Quantum interference between single photons emitted by independent semiconductor nanodevices", SPIE Photonic West, 7225-17, p.158, San Jose, CA, USA (January 28, 2009)
105. D. Press, T.D. Ladd, B. Zhang and Y. Yamamoto, "Complete quantum control of a single electron spin in a quantum dot using picosecond optical pulses", SPIE Photonic West, 7225-02, p.158, San Jose, CA, USA (January 28, 2009)
106. Q. Zhang, C. Langrock, M. M. Fejer, Y. Yamamoto, "Waveguide-based single-pixel up-conversion infrared spectrometer", 60th Pittsburgh Conference on Analytical Chemistry and Applied Spectroscopy, Chicago, IL, USA (March 8, 2009)
107. S. Clark, K. Fu, Q. Zhang, T.D. Ladd, C. Stanley, H.C. Holland, and Y. Yamamoto, "Spin echo in semiconductors using ultrafast optical pulses", 2009 APS March Meeting, A17.0005, Pittsburgh, PA, USA (March 16, 2009)
108. D. Press, T.D. Ladd, B. Zhang, and Y. Yamamoto, "Complete quantum control of a single quantum dot spin using ultrafast optical pulses", 2009 APS March Meeting,

A17.0004, Pittsburgh, PA, USA (March 16, 2009)

109. T.D. Ladd, K. Sanaka, A. Pawlis, K. Lischka, and Y. Yamamoto, “Indistinguishable photons from independent semiconductor single-photon devices”, 2009 APS March Meeting, A17.00012, Pittsburgh, PA, USA (March 16, 2009)
110. G. Roumpos, S. Hoefling, A. Forchel, and Y. Yamamoto, “Single vortex-antivortex pair in an exciton polariton condensate”, 2009 APS March Meeting, H16.00010, Pittsburgh, PA, USA (March 17, 2009)
111. N. Kim, D. Sleiter, T.D. Ladd, K. Nozawa, and Y. Yamamoto, “Photocurrent measurement on donor bound excitons in Si”, 2009 APS March Meeting, H21.00003, Pittsburgh, PA, USA (March 17, 2009)
112. Y. Yamamoto, “Observation of Bogoliubov excitations in exciton-polariton condensates”, 2009 APS March Meeting, T4.00003, Pittsburgh, PA, USA (March 18, 2009)

(3) 特許出願 (SORST 研究の成果に関わる特許 (出願人が JST 以外のものを含む))

	件数
国内出願	0
海外出願	0
計	0

(4) その他特記事項

プレス発表および報道

11/2/2005	朝日新聞	朝刊33面	秋の裏章
11/2/2005	読売新聞	朝刊37面	秋の裏章
11/2/2005	毎日新聞	朝刊3面	秋の裏章
11/2/2005	産経新聞	朝刊28面	秋の裏章
11/2/2005	日本経済新聞	朝刊30・38面	秋の裏章
11/2/2005	東京新聞	朝刊26面	秋の裏章
11/2/2005	日経産業新聞	20面	秋の裏章
2006/07/13	日刊工業新聞	朝刊25面	芽はぐくむ研究室 慶應大学・伊藤公平助教授 同位体の核スピン利用シリコン量子計算を提案
2006/10/23	日刊工業新聞	朝刊18面	東大など 200Kで単一光子発生 窒化ガリウム系量子ドットで
2006/10/23	日経産業新聞	朝刊10面	光の単位粒子「光子」高温で発生 東大など、常温動作に道
2007/06/02	日本経済新聞	朝刊11面	盗聴困難な「量子暗号」NTT、倍の200伝送 機密通信需要にらむ
2007/06/04	電気新聞	朝刊4面	量子暗号鍵 200キロメートルの伝送に成功 NTTなど光ファイバー上で
2007/06/04	電波新聞	朝刊4面	NTT、NIIなど3者 長距離量子暗号システムへ前進 世界最長200キロメートル光ファイバー上で暗号鍵配達に成功
2007/06/04	日刊工業新聞	朝刊17面	世界最速10ギガヘルツの量子暗号 光ファイバーで200km配達 NTTなど
2007/06/04	日経産業新聞 (日経テレコン21)	朝刊9面	量子暗号通信 伝送距離200キロ達成 NTTなど 世界最長記録に
2007/06/04	朝日新聞	朝刊14面・オンライン	「量子暗号」実用化に道 NTTなど送信実験で世界的成果
2007/06/18	知財情報局 @brainia.com	オンライン	量子暗号鍵の伝送距離記録を更新、200Km達成 ~NTT、NII、米NIST共同~
2007/08/01	日経産業新聞 (日経テレコン21)	朝刊23面	【社説総覧】OBIに見る企業像 NTT 人材集う通信の巨人 ライバルや学界にも輩出
2007/09/05	日経産業新聞 (日経テレコン21)	朝刊9面	【半導体進化論 イノベーター列伝 第6部フロンティア再び⑤】量子で計算機を変革 5つの手法本命まだ
2007/11/22	日刊工業新聞	朝刊20面	量子多体现象 超高速で計算処理 NIIと米スタンフォード大光半導体素子を開発
2007/11/22	フジサンケイビジネスアイ	朝刊10面	量子運動 簡単に観測 情報研とスタンフォード大
2007/11/22	日経産業新聞 (日経テレコン21)	朝刊9面	光半導体素子 量子多体を再現 国立情報学研など 微細構造連結で
2007/11/22	ITmedia	オンライン	光半導体素子内で量子多体シミュレーションを可能に
2007/11/22	@IT	オンライン	多数の粒子の相互作用で数学上の問題を解決 日本人研究者らが新方式の量子コンピュータに一歩
2008/01/09	日本経済新聞	朝刊40面	【交遊抄】ゴルフ仲間
2008/01/28	日本経済新聞	朝刊19面	【科学技術立国の一側面】優秀な人材、流出止まらず 外資の引き合い多く
2008/08/04	日本経済新聞	朝刊13面	極低温粒子 摩擦ゼロで移動 固体での初の実証 情報学研など
2008/08/11	化学工業日報	朝刊4面	発光素子の消費電力1万分の1に「超流動」固体で実現
2008/11/13	化学工業日報	朝刊1面	電子スピン状態を光パルスで完全制御
2008/11/13	日経産業新聞	日刊10面	電子スピン 光で制御 量子コンピューター向け 情報学研、超高速演算に道
2008/11/14	日刊工業新聞	朝刊20面	光パルスでスピン制御 半導体ディスク素子技術 情報学研
2008/11/21	科学新聞	週刊4面	電子スピン状態を光パルスで完全制御 量子コン実現へ一歩前進 国立情報学研の山本教授ら成功
2008/11/26	日経産業新聞	11面	【2030年への挑戦 次世代産業技術】量子コンピューター「冷蔵庫型」に熱い視線
2008/12/01	科学技術動向	12月号・p4	【トピックス1】電子スピンを光パルスにより超高速で完全制御

受賞 2007 米国物理学会 フェロー受賞  
 2007 日本応用物理学会 フェロー受賞  
 2006 志田林三郎賞  
 2005 紫綬褒章  
 2005 日本応用物理学会 解説論文賞

## 8. 発展研究による主な研究成果 <ENS>

### (1) 論文発表 (英文論文 17 件)

1. D. Vitali, S. Zippilli, P. Tombesi, and J.-M. Raimond, "Decoherence control with fully quantum feedback schemes", *Journal of Modern Optics* 51, 799-809 (April 2004).
2. P. Hyafil, J. Mozley, A. Perrin, J. Tailleur, G. Nogues, M. Brune, J.-M. Raimond, and S. Haroche, "Coherence-Preserving Trap Architecture for Long-Term Control of Giant Ryberg Atoms", *Physical Review Letters* 93, 103001-1 - 103001-4 (September 2004).
3. T. Meunier, S. Gleyzes, P. Maioli, A. Auffèves, G. Nogues, M. Brune, J.-M. Raimond, and S. Haroche, "Rabi Oscillations Revival Induced by Time Reversal : A Test of Mesoscopic Quantum Coherence", *Physical Review Letters* 94, 010401-1 - 010401-4 (January 2005).
4. P. Milman, A. Auffèves, F. Yamaguchi, M. Brune, J.-M. Raimond, and S. Haroche, "A proposal to test Bell's inequalities with mesoscopic non-local states in cavity QED", *The European Physical Journal D* 32, 233-239 (February 2005).
5. P. Maioli, T. Meunier, S. Gleyzes, A. Auffèves, G. Nogues, M. Brune, J.-M. Raimond, and S. Haroche, "Nondestructive Rydberg Atom Counting with Mesoscopic Fields in a Cavity", *Physical Review Letters* 94, 113601-1 - 113601-4 (March 2005).
6. J. Mozley, P. Hyafil, G. Nogues, M. Brune, J.-M. Raimond, and S. Haroche, "Trapping and coherent manipulation of a Rydberg atom on a microfabricated device : a proposal", *The European Physical Journal D* 35, 43-57 (August 2005).
7. T. Meunier, A. Le Diffon, C. Ruef, P. Degiovanni, and J.-M. Raimond, "Entanglement and decoherence of N atoms and a mesoscopic field in a cavity", *Physical Review A* 74, 033802-1 - 033802-19 (September 2006).
8. T. Nirrengarten, A. Quarry, C. Roux, A. Emmert, G. Nogues, M. Brune, J.-M. Raimond, and S. Haroche, "Realization of a Superconducting Atom Chip", *Physical Review Letters* 97, 200405-1 - 200405-4 (November 2006).
9. S. Gleyzes, S. Kuhr, C. Guerlin, J. Bernu, S. Deléglise, U.B. Hoff, M. Brune, J.-M. Raimond, and S. Haroche, "Quantum jumps of light recording the birth and death of a photon in a cavity", *Nature* 446, 297-300 (March 2007).
10. S. Kuhr, S. Gleyzes, C. Guerlin, J. Bernu, U.B. Hoff, S. Deléglise, S. Osnaghi, M. Brune, J.-M. Raimond, S. Haroche, E. Jacques, P. Bosland, and B. Visentin, "Ultrahigh finesse Fabry-Perot superconducting resonator", *Applied Physics Letters* 90, 164101-1 - 164101-3 (April 2007).
11. D. Vitali, S. Kuhr, M. Brune, and J.-M. Raimond, "A cavity-QED scheme for Heisenberg-limited interferometry", *Journal of Modern Optics* 54, 1551-1567 (July 2007).
12. C. Guerlin, J. Bernu, S. Deléglise, C. Sayrin, S. Gleyzes, S. Kuhr, M. Brune, J.-M. Raimond, and S. Haroche, "Progressive field-state collapse and quantum non-demolition photon counting", *Nature* 448, 889-893 (August 2007).
13. C. Roux, A. Emmert, A. Lupascu, T. Nirrengarten, G. Nogues, M. Brune, J.-M.

Raimond and S. Haroche, "Bose-Einstein condensation on a superconducting atom chip", Europhysics Letters, 81, 56004 (2008)

- (14) S. Deléglise, I. Dotsenko, C. Sayrin, J. Bernu, M. Brune, J. M. Raimond & Serge Haroche, "Reconstruction of non-classical cavity field states and movie of their decoherence", Nature 455, 510 (2008)
  - (15) J. Bernu, S. Deléglise, C. Sayrin, S. Kuhr, I. Dotsenko, M. Brune, J. M. Raimond, and S. Haroche, "Freezing a Coherent Field Growth in a Cavity by Quantum Zeno Effect", Phys. Rev. Lett. 101, 180402 (2008)
  - (16) M. Brune, J. Bernu, C. Guerlin, S. Deléglise, C. Sayrin, S. Gleyzes, S. Kuhr, I. Dotsenko, J. M. Raimond, S. Haroche, "Process tomography of field damping and measurement of Fock state lifetimes by quantum non-demolition photon counting in a cavity", Phys. Rev. Lett. 101, 240402 (2008)
17. A. Emmert, A. Lupa\_scu, G. Nogues, M. Brune, J.-M. Raimond, and S. Haroche, "Measurement of the trapping lifetime close to a cold metallic surface on a cryogenic atom-chip", Eur. Phys.J D 51, 173 (2009).

(2) 口頭発表

①学会

国内 2 件, 海外 97 件

1. M. Brune, "Cavity quantum electrodynamics ", in "Dresden International Workshop and Seminar on Rydberg Physics", Dresden, Germany (April 19 - May 14, 2004)
2. S.Haroche, « Atom-mesoscopic field entanglement », invited talk at the workshop « Decoherence, Entanglement and Information Protection in Complex Quantum Systems», Les Houches, France. (April 2004)
3. S.Haroche, « Manipulating atom-photon entanglement in a cavity », invited talk at Symposium in honour of the 70th birthday of F.De Martini, Rome, Italy. (May 2004)
4. S.Haroche, « Single and Multi-photon states in microwave cavity QED, invited talk at International Quantum Electronics Conference, San Francisco, CA (May 2004)
5. G. Nogues, "Quantum Rabi oscillations in a mesoscopic field", SPIE conference on Fluctuations and Noise 2004, Maspalomas, Spain (May 2004)
6. S.Haroche, « Introduction to Cavity QED », Lectures at Boulder School for condensed matter and materials physics, Boulder, CO (July 2004)
7. S.Haroche, « Single atom index effects on mesoscopic fields in a cavity », invited talk at the International Conference on Atomic Physics ICAP, Rio de Janeiro, Brazil. (July 2004)
8. S.Haroche, « Sharing ideas with Nicim Zagury in Paris and in Rio », invited talk at the Symposium in honour of Nicim Zagury's 70th birthday, Rio de Janeiro, Brazil. (July 2004)
9. S.Haroche, « Introduction to Cavity QED : fundamental tests and applications to quantum information », 3 invited lectures at the Niels Bohr Institute, August 2004, Copenhagen, Denmark. (August 2004)

10. M. Brune, "Entanglement and decoherence using atoms and cavities" in "QUANTUM LOGIC & COMMUNICATION", Cargese, France (August 16-28, 2004)
11. J.M. Raimond, "Mesoscopic quantum coherences in cavity QED experiments", Workshop on microcavities in quantum optics, Ringberg, Germany (September 2004)
12. G. Nogues, P. Hyafil, J. Mozley, M. Brune, J. M. Raimond, and S. Haroche, "A coherence-preserving trap for Rydberg atoms", QIPC V, Rome, Italy (September 20-22, 2004)
13. S.Haroche, « Quantum Non-Demolition measurements in Cavity QED », invited talk at the 333rd Heraeus seminar, Reisenburg, Germany. (September 2004)
14. J.M. Raimond, Entanglement and Decoherence: Mathematics and Physics of Quantum Information and Computation, Oberwolfach, Germany (January 2005)
15. S.Haroche, « Mesoscopic field state superpositions in cavity QED : present status and perspectives », 8ème Conférence Franco-Israélienne d'Optique non linéaire (FRISNO), Ein Bokek, Israël (February 2005)
16. S.Haroche, « Giant atoms and photons in a box: a bottom-up approach to mesoscopic physics », Gordon Research Conference on Quantum Information Science, Ventura, CA (February 2005)
17. G. Nogues, P. Hyafil, J. Mozley, M. Brune, J.-M. Raimond and S. Haroche, "A coherence preserving trap for Rydberg atoms", Quantum optics workshop Obergurgl, Obergurgl, Austria, (February-March 2005)
18. S.Haroche, « Puissance et étrangeté du quantique », cycle 2004-2005 des grandes conférences de Lyon organisée par le Pôle Universitaire de Lyon , Lyon, France. (March 2005)
19. J.M. Raimond, , "Mesoscopic entangled states in cavity QED experiments" Mesoscopic Physics with electrons and photons, Orsay, France (Mach 2005)
20. J.M. Raimond, "Cavity quantum electrodynamics : quantum entanglement and information" Trois cours à l'école NATO/ASI - Quantum information and quantum computation" Chania, Crète, Greece (April 2005)
21. M. Brune: "Rabi oscillation in a cavity: Entanglement, quantum measurement and Schrödinger cats preparation", ICONO/LAT, St Petersbourg, Russia, (May 11-15, 2005)
22. S.Haroche, « Atoms and Photons in a cavity : from qubits to Schrödinger cats », ICONO (International Conference in non linear optics), Saint-Petersbourg, Russie. (May 2005)
23. S.Haroche, « Local and non-local Schrödinger cats in cavity QED », QUPON (Quantum Physics of Nature), Vienne, Austria. (May 2005)
24. S.Haroche, « Einstein, Bohr and the photon : how thought experiments have turned into quantum information physics », Symposium Einstein à la bibliothèque d'Alexandrie, Alexandrie, Egypt. (June 2005)

25. J.M. Raimond, "Giant atoms for explorations of the mesoscopic world", ICOLS 2005, Aviemore, UK (June 2005)
26. M. Brune, " Rabi oscillation in vacuum and mesoscopic fields: Entanglement and Schrödinger cat preparation", QED 2005: " QED, Quantum Vacuum and the Search for New Forces", Les Houches, France, 5-9 (June 2005)
27. S.Haroche, « Schrödinger cats in cavities », Symposium Recent challenges in novel quantum systems , Camerino, Italy (July 2005)
28. S.Haroche, « A modern version of the Einstein-Bohr Photon Box: exploring the quantum with atoms and photons in a cavity », Symposium « The Photon: its First Hundred Years and the Future, Varsovie, Poland (August 2005)
29. S.Haroche, Trois cours sur l'information quantique donnés à l'Ecole d'été de Kochi, Japan (September 2005)
30. J.M. Raimond, "Exploration of the quantum-classical boundary with atoms and cavities", Société suédoise de physique, section de Physique atomique, Umea, Sweden (November 2005)
31. J.M. Raimond, "Quantum information", Société suédoise de Physique, Conférence plénière, Umea, Sweden (November 2005)
32. J.M. Raimond, Heraeus workshop « The photon : generation, detection and application », « Cavity QED: experiments with an Einstein's photon box" Bad Honnef, Germany (November 2005)
33. S.Haroche, «Exploring quantum physics with atoms and photons in cavities», Meeting annuel de la la Société Portugaise de Physique, Porto, Portugal (December 2005)
34. S.Haroche, « From Einstein's photon box to quantum information: the physics of atoms and photons in cavities » , Conférence de clôture de l'année Einstein, Recife, Brasil (December 2005)
35. M. Brune, "Mesoscopic quantum coherences with Rydberg atoms and cavities", GDEST Conference , Munich, Germany. (December 7-9, 2005)
36. J.M. Raimond, "Quantum Information, Computation and Complexity", Trois cours au programme (QICC) à l'Institut Henri Poincaré, Paris. (January 4 - April 7, 2006)
37. S.Haroche, « Quantum information with Rydberg atoms and photons in cavities: results and perspectives », QIP'06 (Quantum Information Physics Conference), Paris, France (January 2006)
38. S.Haroche, « Exploring the states of light: from photon counting to quantum information », General March meeting of the American Physical Society , Baltimore, MD (March 2006)
39. S.Haroche, « Cavity QED in perspective: atom and photon in a box as a model for various effects in atomic and condensed matter physics », CATCOM (Cold Atoms Meets Condensed Matter meeting), Dresde, Germany (March 2006)

40. J.M. Raimond, Lorentz workshop: "beyond the quantum": « explorations of the quantum world with atoms and cavities » Leiden, Netherlands (May 2006)
41. M. Brune, "Entanglement and decoherence using atoms and cavities", 3 lectures, Summer School on Scalable Quantum Information Processing and Computing, Benasque Center for Science, (June 11-24, 2006)
42. J.M. Raimond, Trois cours, 18ème école d'été,: « exploring the quantum with atoms, photons and cavities » Heraklion, Crête, Greece (July 2006)
43. S.Haroche, "Schrödinger cats in Cavity QED and decoherence studies", Symposium « Theoretical and experimental foundations of modern technologies , Durban, South Africa (July 2006)
44. S.Haroche, « Schrödinger cats in Cavity QED and decoherence studies », Conférence Asia Quantum Information Science, Beijing, China (September 2006)
45. S.Haroche, « Ultra strong coupling in Rydberg atom Cavity-QED experiments », WE-Heraeus séminaire "Strong Coupling of Light and Matter", Bad-Honnef, Germany. (September 2006)
46. J.M. Raimond, QEP17-Photon 06,: « exploring the quantum with atoms, photons and cavities » Manchester, UK (September 2006)
47. S.Haroche, « Witnessing the birth, life and death of a photon : the quantum jumps of light in a cavity », US-Japan workshop on Quantum Information Science , Maui, Hawaii (October 2006)
48. M. Brune: "Repeated QND measurement of a qubit: birth, life and death of a single photon", workshop: Quantum Information Processing and Quantum Computation, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden. (October 23-24, 2006)
49. G. Nogues, T. Nirrengarten, A. Qarry, C. Roux, A. Emmert, M. Brune, J.-M. Raimond and S. Haroche, "Trapping and playing with atoms in a cryogenic environment", SFB-TR21 Workshop, Freudenstadt, Germany (October 2006)
50. G. Nogues, T. Nirrengarten, A. Qarry, C. Roux, A. Emmert, M. Brune, J.-M. Raimond and S. Haroche, "Trapping and playing with atoms in a cryogenic environment", Colloque "Calcul quantique avec des atomes et photons", GdR Information Quantique , Institut d'Optique, Palaiseau, France (November 2006)
51. S.Haroche, « Quantum non-demolition measurements of photons in a cavity : observing the quantum jumps of light », FRISNO, Franco-Israelian Seminar in Non-Linear Optics , Les Houches, France. (February 2007)
52. S.Haroche, « Power and Strangeness of the Quantum », Symposium « Physics in our times : how it will evolve and what are the major remaining challenges ?», Fondation du Duca, Paris, France (May 2007)
53. S.Haroche, « Quantum non-demolition counting of photons in a superconducting cavity : the life and death of trapped photons », workshop organisé à l'occasion de la leçon inaugurale de Michel Devoret au Collège de France, Palaiseau, France (May 2007)

54. G. Nogues "Coupling Rydberg atoms to cavities and traps", Hybrid approaches to scalable quantum information systems , ITAMP/Harvard University, Cambridge, MA (May 2007)
55. S.Haroche, « Witnessing the life and death of trapped photons », Symposium Foundations of Modern Physics, Vienne, Austria (June 2007)
56. S.Haroche, « A short history of Cavity Quantum Electrodynamics », 9ème Conférence sur la Cohérence et l'Optique Quantique, Rochester, NY (June 2007)
57. S.Haroche, « Quantum non-demolition measurement of light : the birth, life and death of trapped photons », ICOLS, Conférence Internationale de Spectroscopie Laser, Telluride, CO (June 2007)
58. G. Nogues "Atomes de Rydberg couplés à des cavités ou des pièges supraconducteurs", Colloque "Aspects théorique de l'information quantique", GdR Information Quantique , Aspet, France, (June 2007)
59. J.M. Raimond, Central European workshop on quantum optics, "observing the quantum jumps of light", Palerme, Italy (June 2007)
60. J.M. Raimond, Workshop on quantum engineering with Neutral atoms and light, "observing the quantum jumps of light" Herrshing, Germany (June 2007)
61. M. Brune: "Recording the birth and death of photons in a cavity:", APS meeting: DAMOP, Calgary, Canada (June 5-9, 2007)
62. M. Brune: "Observing Quantum Jumps of light by Quantum-Non-Demolition Measurement", The Ninth Rochester Conference on Coherence and Quantum Optics (CQO9), Rochester, NY (June 10-13, 2007)
63. M. Brune: " Observation des sauts quantiques de la lumière: naissance et mort d'un photon", COLOQ, Grenoble, France (June 2-5 2007)
64. S.Haroche, « From Quantum Non-demolition measurements of photons to the control of quantum states of light in a cavity », Gordon Research Conference on Quantum Control of Light and Matter, , Newport, USA. (August 2007)
65. S.Haroche "Quantum information with atoms and photons in cavities ", 4 Cours à L'Ecole Latino Américaine de Physique, ELAF 2007, Mexico. (August 2007)
66. M. Brune: "Dissipation, quantum measurement and decoherence", , Ecole prédoctorale: "predoctoral school in statistical physics", Les Houches, France. (August 27 – September 7, 2007)
67. S.Haroche, « Quantum non-demolition counting of photons in a cavity: an ideal measurement of light », Photons, Atoms and Qubits Conference, Royal Society, London, UK (September 2007)
68. S.Haroche, « Quantum non-demolition counting of photons applied to the investigation of non-classical states of light », QuAMP 2007, Imperial College, London, UK (September 2007)
69. S.Haroche « Quantum Non-Demolition Counting of Photons in a Cavity : an ideal

measurement of light », QIPC 2007, Barcelone, Spain (October 2007)

70. S.Haroche, "Non-destructive photon counting and reconstruction of photonic "Schrödinger cat" states" in cavity QED", Conference "Quantum Noise in Strongly Correlated Systems", Institut Weizman, Israël. (January 2008)
71. S.Haroche, "Champs mésoscopiques non-locaux en électrodynamique quantique en cavité, Colloque ANR Lumière, Orsay, France (January 2008)
72. S.Haroche, "Quantum Non-Demolition counting of photons in Cavity QED", Workshop SQUINT Southwest Quantum information and technology, Santa Fe, NM (February 2008)
73. M. Brune "Cavity QED with Rydberg atoms: QND measurement of photon number and Wigner function measurement of a Schrödinger cat state", ESF conference: QUANTUM OPTICS: FROM PHOTONS AND ATOMS TO MOLECULES AND SOLID STATE SYSTEMS, Obergurgl, Austria (February 24 –March 1, 2008)
74. S.Haroche, « Trapping and counting photons without destroying them: a new way to look at light », Meeting of the Finnish phsyical Society, Turku, Finland. (March 2008)
75. J.M. Raimond Tutorial "Quantum noise, quantum limited measurements and conditional quantum evolution", APS March meeting, "Experimental realization of quantum trajectories" New Orleans, USA (March 2008)
76. M. Brune "Reconstructing the evolving Wigner function of a Schrödinger cat trapped in a cavity: a movie of decoherence", Solvay Workshop on Bits, Quanta, and Complex System, Brussels, Belgium (April 30 - May 3, 2008)
77. M. Brune, "Reconstructing the evolving Wigner function of a Schrödinger cat trapped in a cavity" : a movie of decoherence, Solvay Workshop on Bits, Quanta, and Complex System, Brussels (April 30 - May 3, 2008).
78. S.Haroche, "QND photon counting applied to the preparation and reconstruction of Schrödinger cat states of light trapped in a cavity", Conference on precision measurements with quantum gases, Trente, Italy (April 2008)
79. S.Haroche, "Generating and reconstructing non-classical photonic states in Cavity QED" : present stage and perspectives, Solvay Workshop on Bits, Quanta, and Complex System, Brussels, Belgium (May 2008)
80. S.Haroche, "Reconstructing the Wigner function of photonic Schrödinger cats in cavity" : a movie of decoherence, Workshop on Quantum Phenomena and Information, Trieste, Italy (May 2008)
81. S.Haroche, "From atom to light quantum jumps" : applying to photons the wizard tricks learned from Peter Toschek and his ion trapper colleagues, Symposium en l'Honneur de Peter Toschek, Hambourg, Germany (June 2008)
82. M. Brune: "Cavity QED experiments with Rydberg atoms and photons", SFB/TRR 21 - Sommerschule im Heinrich-Fabri-Institut Blaubeuren, Germany, (July 23-25, 2008).
83. S.Haroche, "Non-demolition photon counting and field quantum state reconstruction in a cavity" : a new way to look at light, EGAS Conference, Graz, Autriche (July 2008)

84. S.Haroche: "Exploring the quantum dynamics of atoms and photons in cavities", Enrico Fermi Summer School, Varenna, Italy (July 2008)
85. S.Haroche: "Observation of light quantum jumps and time-resolved reconstruction of field states in a cavity", International Conference on Atomic Physics, Storrs, Connecticut, USA (August 2008)
86. S.Haroche: "Reconstructing Fock and Schrödinger cat states of light with movies of their decoherence by quantum non-demolition photon counting in a cavity", Workshop on Decoherence, Benasque, Spain (September 2008)
87. J.M. Raimond "QND measurements and quantum state reconstruction in cavity QED" Quantum and Classical Control and quantum information workshop, Otranto, Italy, (September 2008)
88. J.M. Raimond "Life and death of a photon" 2008 Ontology conference, San Sebastian, Espagne, Spain (October 2008)
89. S.Haroche: "Compter des photons sans les détruire: une nouvelle façon de voir", Colloque GdR, Paris, France (October 2008)
90. S.Haroche: "Quantum non-demolition photon counting, state reconstruction and decoherence monitoring in Cavity QED experiments" Quantum Optics IV South American Conference, Florianopolis, Brazil (October 2008).
91. S.Haroche: "Counting non-destructively photons in a cavity, reconstructing Schrödinger cat states of light and realizing movies of their decoherence", International workshop on fundamentals of light-matter interactions, Recife, Brazil (October 2008)
92. S.Haroche: "Counting non-destructively photons in a cavity, reconstructing Schrödinger cat states of light and realizing movies of their decoherence", Institute for Theoretical Atomic and Molecular Physics Workshop, Harvard University, Cambridge, US (November 2008)
93. S. Haroche: "Quantum Non-Demolition photon counting and non-classical field state reconstruction in Cavity QED experiments", International Symposium on Physics of Quantum Technology, Nara, Japan (November 2008)
94. G. Nogues, "Coupling atoms and photons, a possible interface for quantum computation", 1st French-US Symposium "Frontiers of science", Roscoff, France, (November 2008)
95. G. Nogues, "Cryogenic atom-chips for ground state and Rydberg atoms", International Conference on Cold Atoms, Kolkata, India, (December 12-16 2008)
96. M. Brune: "Atoms cavities and photons: a case study for quantum measurement and decoherence". Third School and Workshop on "Mathematical Methods in Quantum Mechanics" Bressanone, Italy (February 16 - 21, 2009).
97. S.Haroche: "Exploring the quantumness of light in a cavity", France-Israël workshop in Non-Linear Optics (FRISNO), Ein Gedi, Israël. (February 2009)
98. J.M. Raimond "Quantum states measurement in cavity QED" International Conference

on Scalable quantum computing with Light and Atoms, Cortina d'Ampezzo, Italy,  
(February 2009)

99. S.Haroche: "The Power and Strangeness of the Quantum", Dodd Lecture, Dunedin,  
New Zealand (March 2009)

## 9. 結び

中性原子やトラップイオンを用いた識別できない単一光子の発生については以前に報告があったが、2つの<sup>19</sup>F:ZnSe ドナー不純物からの識別できない単一光子の発生は、固体素子としては初めてのものである。

ポスト型 DBR マイクロキャビティー、マイクロディスクキャビティー共に、共振器 Q 値を  $10^4$  以上に改良し、キャビティー光子と単一量子ドット励起子の強結合を達成した。アンチクロシング特性とアンチバンチングが同時に同一の系で実証されたのも、固体素子としてはこれが初めてのことである。量子中継や量子コンピュータへの応用を考えた場合、固体素子での成功は大きな意味を持つ。

単一の極短光パルスを用いた電子スピンの制御技術は、量子情報処理への応用という視点から次の意味を持つ。

通常のマイクロ波を用いた ESR に比べ、電子スピンの回転を極めて短い時間で行える。特にラーモア周期よりも十分に短い時間内に電子スピンが回転できることから、将来は  $T_2$  時間のみでなく、 $T_1$  時間さえも延ばすことが可能になろう。

通常のマイクロ波を用いた ESR に比べ、小さな空間に制御光をフォーカスできる。これにより、2次元空間に配置された電子スピン格子の中の単一の電子スピンのみに回転を与えることが可能となる。

励起子ポラリトンの金属膜を用いたトラップを形成し、安定した BEC 凝縮体の実現に成功した。今後、この系を用いて、超流動モット絶縁体相転移や様々な P 波ホダーの実験的検証を進めていく予定である。また、BEC に伴う誘導冷却現象を利用して NP 完全問題を解く量子コンピューターの可能性についても最近検討を開始した。今後は、この方面での研究も強化していく予定である。

單一リドベルグ原子と超伝導キャビティの強結合を利用して、エンタングルメントの人工的制御をめざした。第 1 のプロジェクトでは、光子寿命 100ms 以上の高 Q 超伝導キャビティを 2 個建設し、これを用いて単一光子の量子非破壊測定に初めて成功した。今後は、3qubit 量子ゲート操作、ハイゼルベルグ限界の原子分光を実現する予定である。また、光子のシュレジンガーの猫状態を形成し、そのデコヒーレンス特性を初めて解明した。今後は、2つのキャビティ間にシュレジンガーの猫状態を生成し、そのデコヒーレンス特性を解明する。第 2 のプロジェクトでは、レーザー光により生成された冷却原子あるいはボーズ凝縮相からスタートし、双極子相互作用を利用して単一の原子を決められた時刻にキャビティへ注入する実験を行なった。また、アトムチップと呼ばれる集積回路デバイスでの冷却原子 BEC を実現した。今後はこれらの要素技術を組み合わせて、原子と共振器に基づく量子情報処理の研究へと発展させていく予定である。